

## 극한 환경 MEMS용 SiCOI 구조 제작

정귀상<sup>†</sup> · 정연식\* · 류지구\*\*

### Fabrication of SiCOI Structures for MEMS Applications in Harsh Environments

Gwiy-Sang Chung<sup>†</sup>, Yun-Sik Chung\*, and Ji-Goo Ryu\*\*

#### Abstract

This paper describes on an advanced technology of 3C-SiC/Si(100) wafer direct bonding using PECVD oxide to intermediate layer for SiCOI(SiC-on-Insulator) structure because it has an attractive characteristics such as a lower thermal stress, deposition temperature, more quick deposition rate and higher bonding strength than common used poly-Si and thermal oxide. The PECVD oxide was characterized by ATR-FTIR. The bonding strength with variation of HF pre treatment condition was measured by tensile strength measurement system. After etch-back using TMAH solution, roughness of 3C-SiC surface crystallinity and bonded interface was measured and analyzed by AFM, XRD, and SEM respectively.

**Key Words :** SiCOI, 3C-SiC, etch-back

#### 1. 서 론

최근 차세대 반도체 소재로 주목되고 있는 탄화규소(SiC: Silicon Carbide)는 전기적, 열적 특성이 우수하여 고온, 고주파, 고출력용 반도체 소자로서 각광받고 있다. 또한 우수한 화학적 안정성과 함께 높은 열전도도로 인해 극한 환경에서의 사용과 고집적 소자제조에 이점이 있다<sup>[1,2]</sup>.

수많은 Polytype-SiC중 3C( $\beta$ )-SiC는 벌크 성장이 불가능하나 Si 속에 고온 multiple C 이온주입 후, 열처리를 통해 SiC 층을 형성시키는 방법과 Si와 SOI 기판 위에 CVD(chemical vapor deposition)법을 이용한 이중박막의 성장이 가능하다<sup>[3,4]</sup>. 그러나 단결정 3C-SiC의 이중결정 성장은 고온으로 인한 Si와 3C-SiC 박막 경계면에서의 격자부정합(20%)과 열팽창계수차(8%)로 인한 3C-SiC 박막의 높은 결함밀도와 큰 누설전류 때문에 소자 제조시 성능이 크게 떨어진다<sup>[5]</sup>. 이러한 문

제점 해결을 위해 wafer bonding을 이용한 산화막 위에 단결정 3C-SiC 층이 존재하는 SiCOI(SiC-on-Insulator)구조 제조에 관한 연구가 수행되고 있다<sup>[6]</sup>.

SiCOI 구조 제조방법에는 SOI 기판위에 3C-SiC 박막을 이중결정 성장하는 방법과 3C-SiC/Si 기판과 Si 기판을 산화하여 두 기판을 접합한 후 3C-SiC/Si 기판을 후면식각하는 방법이 있다<sup>[7]</sup>. SOI 기판위에 3C-SiC를 이중결정 성장하는 방법은 Si와 3C-SiC 사이의 열팽창계수와 격자부정합, 박막내에 높은 부정합 전위밀도, cracking, APB(antiphase boundary) 생성 등을 해결할 수 없기 때문에 Krashna N. Vinod 등과 U. Tong와 U. Gosele는 poly-Si와 열산화막을 접합 매개층으로 사용하여 SiCOI 구조를 제조하였으나<sup>[8,9]</sup>, 본 연구에서는 성장된 3C-SiC 박막과 산화막간의 화학적 결합력을 높이기 위해 열산화와 짧은 시간동안 두꺼운 산화막 증착이 가능하며, 직접접합시, 접합강도가 우수한 PECVD 절연막을 접합 매개층으로 사용하였고, 접합 후 열처리시 void 발생의 주요 원인으로 지적되고 있는 hydrocarbon과 파티클 제거에 우수한 특성을 보이는 HF용액과 DI water 세정공정을 병행함으로써 불순물을 포함하는 표면의 산화막을 제거한 후, SiO<sub>2</sub>가 가지는 친수성 특성을 이용한 접합계면에서 높은 초기접합력을 갖는 직접접합을 수행하였다. 초기접합 후, 접합계면의

동서대학교 메카트로닉스공학과(Dept. of Mechatronics Eng., Dongseo University)

\*KEC 신소재기술연구소(KEC)

\*\*부경대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng., Pukyong National University)

<sup>†</sup>Corresponding author: gschung@dongseo.ac.kr

(Received : February 18, 2004, Accepted : March 9, 2004)

화학적 반응에 의한 큰 접합강도를 도출하기 위해 1100°C, N<sub>2</sub> 분위기에서 1시간 동안 열처리를 수행하였다. 단결정 3C-SiC를 식각정지막으로 이용하여 이방성 식각용액인 TMAH 20 wt%(80°C)에서 후면식각(etch-back)을 수행하여 SiCOI 구조를 제조하였다.

증착된 PECVD 절연막의 친수성 특성은 ATR-FTIR, HF 전처리 조건에 따른 박막의 표면 거칠기는 AFM, 초기접합 조건에 따른 접합력은 인장시험기, 그리고 후면식각 후, 식각정지막인 3C-SiC 박막의 표면거칠기와 결정성, 그리고 SiCOI 구조의 측면 이미지를 AFM, XRD, SEM으로 각각 분석·평가하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 Si(100)기판위에 이중결정 성장된 단결정 3C-SiC 박막을 갖는 handle 기판과 Si(100)기판을 active 기판으로 각각 사용하였다. 그림 1은 SiCOI 구조용 3C-SiC 기판의 직접접합 공정 순서도이다. 먼저, APCVD법으로 1350°C에서 3C-SiC 박막을 handle 기판위에 이중결정 성장시켰다. 성장된 3C-SiC 박막과

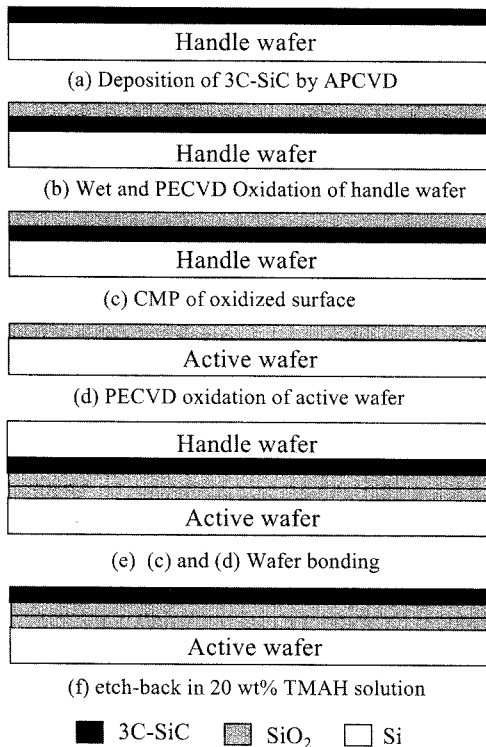


그림 1. SiCOI 구조 제조공정 순서도

Fig. 1. Fabrication process sequence of SiCOI structures.

산화막의 화학적 결합력을 높이기 위해 1100°C에서 6시간 동안 열산화막을 성장했으며, 300°C에서 45분간 PECVD 절연막을 증착하였다. 한편, active 기판은 약 1.5 μm의 절연막을 PECVD 증착하였다. 초기접합을 위해 각각의 기판은 1000°C 열처리와 CMP(Cheical Mechanical Polishing)공정을 수행하였다<sup>[10]</sup>. 그리고, 각각의 기판은 초기접합을 위해 HF와 H<sub>2</sub>O를 각각의 농도(1.0, 1.5, 2.0, 2.5%)로 희석한 용액에서 1분간 전처리하고, DI water에 세정하였다. 기판접합에 영향을 미치는 이온들이 기판 표면상에 다량으로 존재할 수 있도록 건조하지 않고 초기접합을 수행했다. 초기접합시 인가하중(0.1, 0.5, 1.0 kg/cm<sup>2</sup>)과 HF의 농도 따른 초기접합력의 변화를 비교하였다. Vacuum chamber에서 초기접합 후 열처리(1100°C, 1 hr.)를 하였으며, etch-back 기술로 3C-SiC 박막을 식각정지층으로 이용하여 SiCOI 구조를 제조하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 각 공정별 박막 표면 거칠기를 AFM으로 분석한 것이다. 그림 2(a)는 APCVD법으로 성장된 3C-SiC 박막의 표면 거칠기(RMS roughness)로 65.8 Å이다. 또한 (b)와 (c)는 3C-SiC 박막 위에 순차적으로 열산화막과 PECVD 절연막을 각각 형성했을 경우, 표면 거칠기가 89.08 Å과 86.7 Å으로 더욱 거친 박막 표면이 나타났다. 외부 인가하중 없이 초기 접합을 위해서는 박막 표면 거칠기가 5 Å 이하가 되어야 한다. (d)

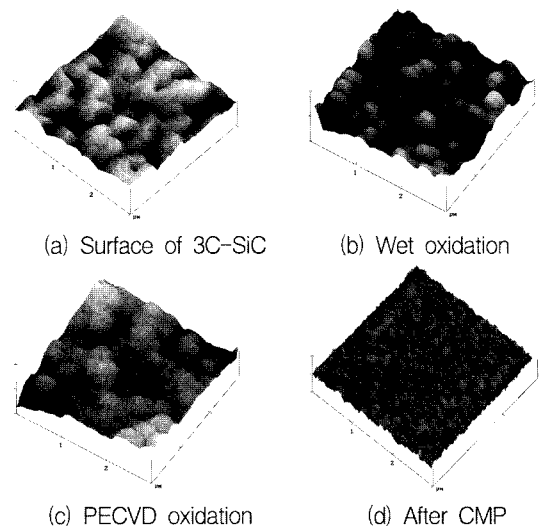


그림 2. 각 공정별 박막 표면의 AFM 이미지

Fig. 2. AFM images according to each process sequences.

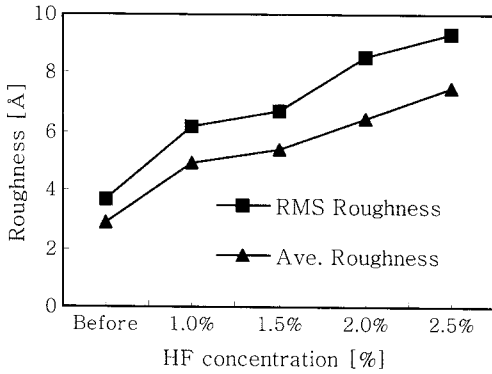


그림 3. HF 농도에 따른 PECVD 절연막의 표면 거칠기  
Fig. 3. Surface roughness of PECVD oxide with variation of HF concentration.

는 CMP 후의 AFM 이미지로 평균 표면 거칠기가 3.97 Å으로 자발적인 접합이 가능한 평탄한 박막표면을 얻었다.

그림 3은 HF 전처리 용액의 농도에 따른 PECVD 절연막 평탄도의 변화를 각각 나타낸 것이다. 표면의 거칠기는 HF 전처리를 행하므로 대체적으로 거칠어지며, 특히 직접접합의 경우, 접합력은 기판 표면의 거칠기에 크게 의존한다. HF 농도가 증가함에 따라 접합력이 증가하나 2.5%의 HF 농도에서 초기접합력이 다소 감소하는 것은 박막표면의 거칠기가 많이 거칠어졌기 때문으로 보인다.

그림 4는 HF 전처리 용액의 농도(1.0, 1.5, 2.0, 2.5%)에 따른 PECVD 절연막의 ATR-FTIR spectra를 나타낸 것이다. 1200 cm<sup>-1</sup> 주변에서 투과되는 파장영역은 Si-O 결합구조의 stretching, 800 cm<sup>-1</sup> 주변의 파장영역은 bending, 420 cm<sup>-1</sup> 주변의 파장영역에서는

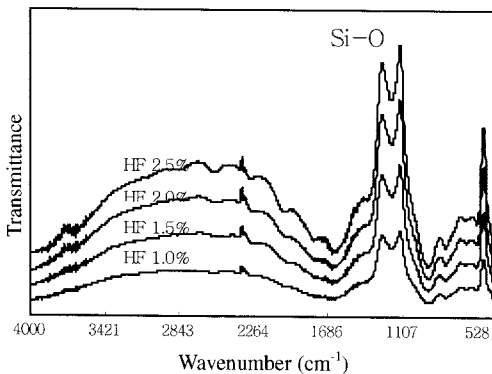


그림 4. HF 농도에 따른 PECVD 절연막의 ATR-FTIR spectra  
Fig. 4. ATR-FTIR spectra of PECVD oxide with variation of HF concentration.

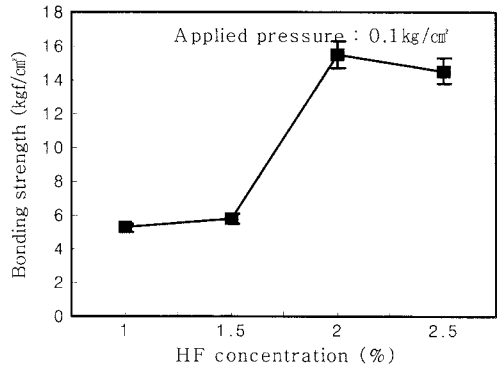


그림 5. HF 농도에 따른 초기접합 강도  
Fig. 5. Pre-bonding strength with variation of HF concentration.

rocking이 나타났다. 1600~1800 cm<sup>-1</sup>의 영역은 공기 중의 수증기에 의한 투과를 나타낸다. 3200~3500 cm<sup>-1</sup> 사이의 영역은 접합면에서의 H<sub>2</sub>O 분자에 의한 투과이다. 3550 cm<sup>-1</sup>에서의 피크는 서로 수소결합(hydrogen-bonded)된 두 개의 인접한 OH-group쌍 때문이며 3650 cm<sup>-1</sup>에서의 피크는 복합적으로 수소결합된 여러 개의 인접한 OH-group쌍 때문이다. 그리고 3750 cm<sup>-1</sup>에서는 단일 OH-group 때문에 나타나는 결과이다. 이와 같은 결과에서 초기접합력에 크게 영향을 미치는 OH-group이나 OH-group사이의 수소결합이 존재함을 확인할 수 있다. 또한 HF 전처리 농도의 증가에 따라 Si-O 결합구조의 stretching이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 5는 고정된 인가하중(0.1 kg/cm<sup>2</sup>)하에서 HF 농도에 따른 초기접합된 기판들의 접합강도를 나타낸 것이다. 초기 접합강도는 HF 농도가 증가할수록 최소 5.3 kgf/cm<sup>2</sup>에서 최대 약 15.5 kgf/cm<sup>2</sup>까지 증가했다. 이는 HF 농도에 따라 기판 표면에 존재하는 H, F 이온들이 DI water로 세정할 때 OH-group들로 치환되며, DI water 세정전의 H와 F 이온들의 증가에 따라 치환된 OH-group의 양이 증가하기 때문에 나타나는 결과로 사료된다. 특히, HF 농도가 2.0%에서 최대의 초기 접합 강도를 갖는 것으로 나타났고, 그 이상의 농도에서는 접합강도가 다소 감소하는 결과가 나타났다.

그림 6은 초기접합강도가 가장 크게 나타난 희석된 HF(2.0%)용액에서 인가하중(0.1, 0.5, 1.0 kg/cm<sup>2</sup>)의 변화에 따른 초기접합 강도의 변화를 나타낸 것이다. 초기접합강도는 인가하중의 증가에 따라 조금씩 증가하였다. 이는 HF 농도에 따른 접합강도의 변화와 비교해 볼 때, 접합강도는 초기접합시의 인가하중보다 HF 농도 변화에 크게 의존함을 알 수 있다. 1100°C(N<sub>2</sub>, 60

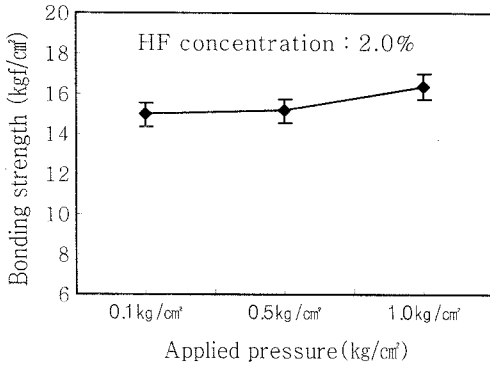


그림 6. 인가하중에 따른 초기접합강도  
Fig. 6. Pre-bonding strength with variation of applied pressure.

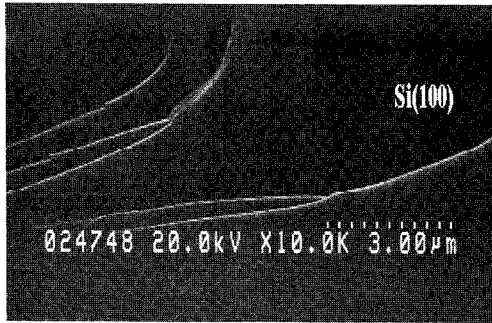


그림 7. 초기 접합 후 단면 SEM 이미지  
Fig. 7. SEM images of pre-bonded wafer.

min)에서 열처리한 후의 접합강도는 접합력 측정을 위해 외부 구조물 제작에 사용한 epoxy(한계 접합 80~90 kgf/cm<sup>2</sup>)의 파괴로 epoxy 접합력 이상은 분석할 수 없었다.

그림 7은 초기접합강도가 가장 크게 나타난 HF 전처리 용액의 농도 2.0%와 인가하중 0.1 kg/cm<sup>2</sup>에서 초기접합 후, SEM 사진으로 접합면 부분이 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 8(a)는 Si(100)기판위에 성장된 단결정 3C-SiC 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 3C-SiC 박막은  $2\theta = 41.5^\circ$ 와  $69^\circ$ 에서 매우 좁고 강한 두 개의 피크가 관찰되었다. 이것은 Si(100) 기판위에 성장된 단결정 3C-SiC (200) 피크와 기판인 Si의 (400) 피크로써 Iwanowski 등의 연구결과와 일치하였다<sup>[11]</sup>. 그림 8(b)는 etch-back 후, 3C-SiC 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. etch-back 후 3C-SiC 박막도  $2\theta = 41.5^\circ$ 와  $69^\circ$ 에서 두 개의 피크가 관찰되었다. 그러나 3C-SiC 회절 피크의 경우 박막성장 후 피크에 비해 피크의 강도가 작고, 폭이 넓게 나타났다. 이는 3C-SiC 박막 성장시

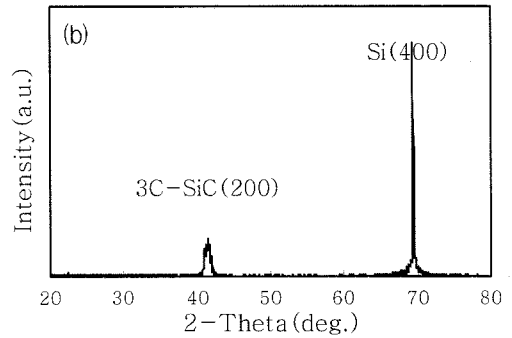
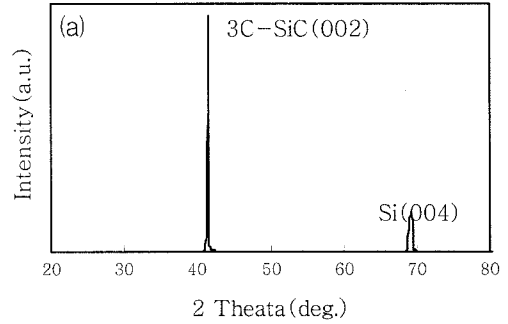


그림 8. (a) Si 기판에 성장된 3C-SiC와 (b) etch-back 후 XRD 패턴  
Fig. 8. XRD pattern of (a) 3C-SiC grown on Si wafer and (b) after etch-back.

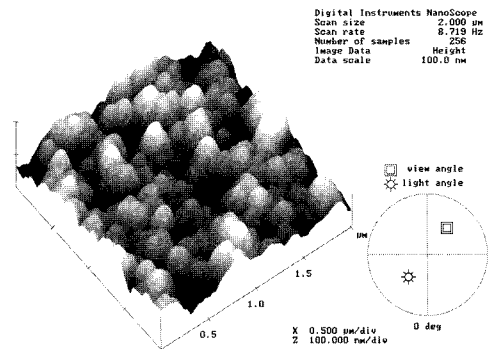


그림 9. Etch-back 후 SiC표면 AFM 사진  
Fig. 9. AFM images of SiC surface after etch-back.

결정의 크기가 박막의 두께가 증가함에 따라 증가했을을 알 수 있다.

그림 9는 후면식각 후, 3C-SiC 박막의 표면을 AFM으로 실온에서 분석한 이미지이다. 박막 표면의 RMS roughness는 210 Å으로 매우 거칠게 나타났다. 이는 이중결정 성장시 Si(100)기판과 3C-SiC간의 열팽창계수(8%)와 격자부정합(20%) 때문이다.

그림 10은 SDB와 후면식각 기술로 기판 직접 접합

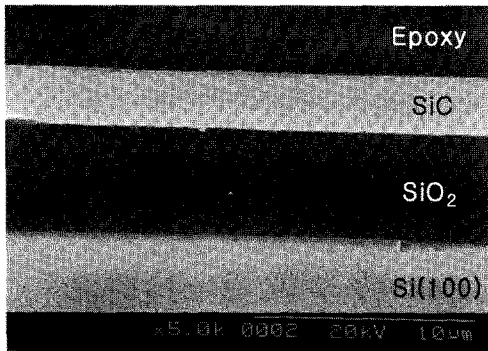


그림 10. 기판 직접 접합과 후면식각 기술로 제작된 SiCOI 구조의 단면 SEM 이미지  
 Fig. 10. SEM image of SiCOI structures fabricated by wafer direct bonding and etch-back.

과 후면식각 기술로 제작한 SiCOI 구조의 접합계면 부분을 나타낸 SEM 이미지이다. 이는 열처리를 후 접합 매개층의 접합계면이 화학적 반응으로 인해 존재하지 않는 단일 산화막위에 SiC가 있는 SiCOI 구조임을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이종결정 성장된 3C-SiC 박막과 Si 기판간의 높은 결합밀도 해결을 위하여 직접접합시 접합강도가 우수한 PECVD 절연막을 접합 매개층으로 사용하고 기판 직접접합과 후면식각 기술을 이용하여 SiCOI 구조를 제조하였다.

(1) HF 농도(1.0, 1.5, 2.0, 2.5%)에 따른 초기접합강도는 HF농도 2.0%에서 약 15.5 kgf/cm<sup>2</sup>로 가장 크게 나타났으며, 2.5%에서는 다소 감소하였다. 인가하중(0.1, 0.5, 1.0 kgf/cm<sup>2</sup>)에 따른 접합강도의 변화는 없었다.

(2) 이방성 식각용액 TMAH 20 wt%로 후면식각 후, XRD 분석으로부터 식각정지층이 단결정 3C-SiC 박막임을 확인하였고, SEM 분석을 통해 접합계면(SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>)이 존재하지 않는 산화막 위에 단결정 3C-SiC가 존재하는 SiCOI 구조임을 알 수 있었다.

향후, 급속히 발전하고 있는 Si 마이크로머시닝기술을 SiC 소자 제작공정에 적절히 응용한다면, 극한 환경 SiC-MEMS용 소자개발에 유용하게 적용되어질 것으로 기대되며, 본 연구에서 제안된 PECVD 절연막을 매개층으로 사용하여 SDB와 후면식각 기술로 제작한 단결정 3C-SiCOI 구조는 Si 마이크로머시닝기술을 이용한 초고온 MEMS용 SiC소자 연구개발에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지역전략산업 석·박사 연구인력 양성사업의 연구결과로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] Y. T. Yang, K. L. Ekinci, X. M. H. Huang, L. M. Schiavone, and M. L. Roukes, "Monocrystalline silicon carbide nanoelectro mechanical systems", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 2, pp. 165-167, 2001.
- [2] T. Homma, K. Kamimura, H. Y. Cai, and Y. Onuma, "Preparation of polycrystalline SiC films for sensors used at high temperature", *Sensors & Actuators A*, vol. 40, pp. 93-96, 1994.
- [3] K. Yasui, K. Asada, and T. Akakane, "Epitaxial growth of 3C-SiC films on Si substrates by triode plasma CVD using dimethylsilane", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 159, pp. 556-560, 2000.
- [4] J. H. Ko and S. I. Woo, "A study on chemical vapor deposition process for the preparation of thin SiC films", *J. of KIEEME*, vol. 4, no. 4, pp. 344-353, 1991.
- [5] G. Muller and G. Krotz, "SiC as a new sensor material", *The 7th Int. Conf. Solid-State Sensors & Actuators*, pp. 948-953, 1993.
- [6] E. Hugonnard-Bruyere, J. L. Cantin, H. J. von Bardeleben, F. Letertre, L. Dicioccio, and T. Ouisse, "Defect studies in epitaxial SiC-6H layers on insulator(SiCOI)", *Microelectronic Eng.*, vol. 48, pp. 277-280, 1999.
- [7] L. Di Cioccio, F. Letertre, Y. Le Tiec, A. M. Papon, C. Jaussaud, and M. Bruel, "Silicon carbide on insulator formation by the smart-cut process", *Mater. Sci. & Eng.*, vol. 46, pp. 349-356, 1997.
- [8] K. N. Vinod, C. A. Zorman, A. A. Yasseen, and M. Mehregany, "Fabrication of low defect density 3C-SiC on SiO<sub>2</sub> structures using wafer bonding techniques", *J. of Elec. Mater.*, vol. 27, no. 3, pp. L17-L20, 1988.
- [9] Q. Y. Tong, U. Gosele, C. Yuan, A. J. Steckl, and M. Reiche, "Silicon carbide wafer bonding", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 1, pp. 232-236, 1995.
- [10] 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*, vol. 12, no. 7, pp. 650-656, 1999.
- [11] R. J. Iwanowski, K. Fronc, W. Paszkowicz, and M. Heinonen, "XPS and XRD study of crystalline 3C-SiC grown by sublimation method", *J. Alloys & Compounds*, vol. 286, pp. 143-147, 1999.



### 정 귀 상

- 1982년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1985년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1992년 2월 일본 도요하시기술과학대학 졸업(공학박사)
- 1993년 ~ 현재 동서대학교 정보시스템공학부
- 부교수
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC 및 SiCN-M/NEMS, 압전 및 SMA 액추에이터



### 정 연 식

- 2001년 2월 동서대학교 메카트로닉스공학과 졸업(공학사)
- 2003년 2월 부경대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 2004년 ~ 현재 KEC 재직
- 주관심분야 : SiC, 반도체 센서



### 류 지 구

- 1977년 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1979년 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 영남대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1979년 ~ 현재 부경대학교 전자공학과 교수
- 1989년 1월 ~ 1990년 1월 도요하시기술과학대학교 객원 연구원
- 주관심분야 : 반도체 센서 및 집적화