

## 3C-SiC/Si 에피층 성장과 Ga 불순물 효과

박국상\*, 김광철, 김선중, 서영훈, 남기석, 이형재(전북대학교 반도체 물성 연구소), 나훈균(기초과학 지원 연구소), 김정윤, 이기암(단국대학교 물리학과).

### ABSTRACT

High quality 3C-SiC epilayer was grown on Si(111) at 1250 °C using chemical vapor deposition(CVD) technique by pyrolyzing tetramethylsilane(TMS). 3C-SiC epilayer was doped by tetramethylgallium(TMGa) during the CVD growth. The crystallinity of 3C-SiC was significantly enhanced by doping the gallium impurity.

### 1. 서론

실리콘(Si)을 기반으로 하는 전자 기술이 발달됨에 따라 Si의 전기-광학적 특성의 한계를 극복하는 새로운 전자재료가 요구되어 왔다. 실리콘 카바이드(SiC)는 광대역 에너지 띠 간격(wide energy bandgap, 2.2-3.3 eV)을 가지며, 고전력(high-power), 고주파수(high-frequency), 고온(high-temperature) 및 내환경성 재료로서 잘 알려져 있다[1-3]. 3C-SiC는 Si 위에서 에피층(epilayer)으로 성장되는데, SiC는 Si 관련 기술을 사용할 수 있으며, 광대역 반도체로서는 드물게 p- 및 n-type 전도형 변환이 용이하여 새로운 전자 재료로서 유망하다. 그러나 SiC와 Si의 격자상수 및 열팽창 계수의 차이가 매우 커서 SiC 에피층 성장이 어렵다. 이러한 이종 접합(hetero-junction)의 성

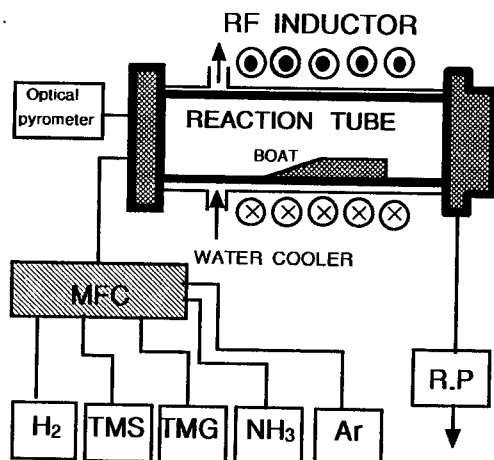


Fig. 1. A schematic diagram of CVD growth system.

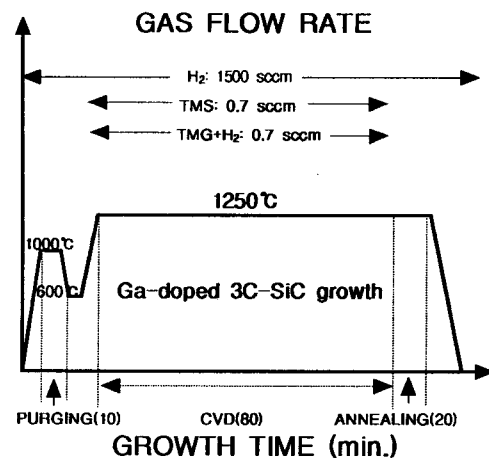


Fig. 2. Temperature and gas flow program for the CVD growth.

장의 어려움은 SiC 에피층 성장 전 탄화공정(carbonization)이나 완충층(buffer layer)을 사용하여 상당히 극복된다[4]. 또한 불순물을 첨가하면 박막의 결정성을 개선시킬 수 있다[5].

본 연구에서는 화학 기상 증착(CVD)으로 3C-SiC 에피층 성장 중에 Ga를 첨가하여, 첨가된 Ga이 3C-SiC의 결정성 및 3C-SiC/Si 계면 특성에 미치는 영향을 X-ray diffraction(XRD), Fourier transform infrared(FTIR) spectroscopy, Transmission electron microscopy(TEM) 및 라만 스펙트럼(Raman spectrum)으로 조사하였다.

2. 실험

Si(111) 기판 위에 3C-SiC 에피층을 성장하기 위하여 원료 gas로서 tetramethyl-silane(TMS)를 RF-유도가열 방식으로 열분해하였다. Fig. 1은 CVD 장치로서 반응관, 진공 장치 및 가스 공급 장치로 구성되어 있다. 사용된 기판은 n-형 Si(111)으로서 비저항이 약 20 Ωcm이었다. 수송 가스는 수소(H<sub>2</sub>)이고, Ga-도핑을 위한 가스로는 tetramethylgallium(TMGa)이었다. 반응관(reactor)으로 유입되는 가스들의 유량과 SiC 성장 온도를 Fig. 2에 나타냈다. SiC 성장 과정은 Si 기판 세정, 3C-SiC 성장 및 성장 후 열처리 단계로 구분된다. Si(111) 기판은 흑연(graphite) 위에서 가열되는데, 온도는 광고온계(optical pyrometer)로 측정 및 조절된다. SiC 성장 온도는 1250 °C였고, 성장 중 반응관 내의 압력은 약 10 torr였다.

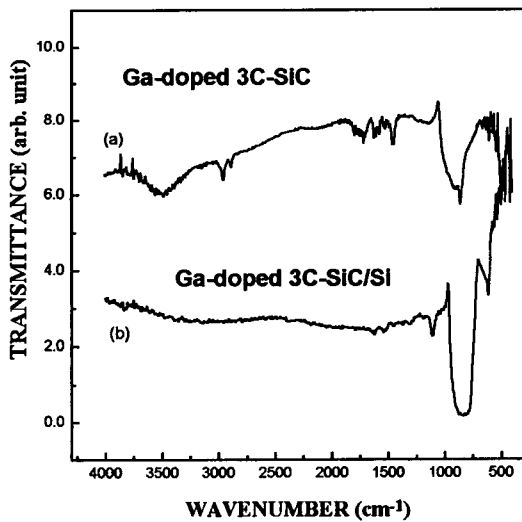


Fig. 3. Infrared transmission spectra of (a) Ga-SiC free film and (b) Ga-SiC/Si.

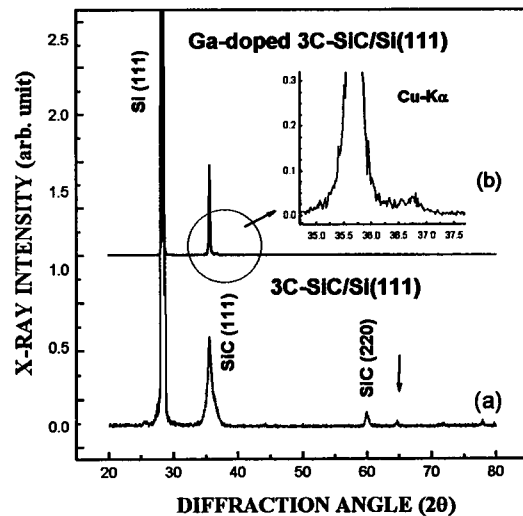


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of (a) undoped and (b) Ga-doped SiC/Si.

3. 실험 결과 및 분석

SiC 결정 성장 및 도핑을 위해 사용되는 TMS와 TMGa는 거의 Si, Ga, CH<sub>n</sub>(n=1~4) 및 C<sub>2</sub>H<sub>n</sub>(n=2~6)등의 반응 가스들로 분해되고, 분해된 가스들은 Si 기판 근처에서 반응하여 Ga-도핑된 SiC 박막을 성장시킨다. 성장된 Ga-SiC/Si 시료의 화학 결합은 FTIR spectrometer로 측정되었다. Fig. 3(a)와 (b)는 Si 기판을 제거한 Ga-SiC 및 Si 기판 위의 Ga-SiC의 스펙트럼인데, Si-C 결합의 흡수대는 780 cm<sup>-1</sup> 근처에서 나타난다. Si-C 결합의 흡수대가 큰 것으로 보아 SiC가 잘 성장된 것으로 보이며, (b)에서 780 cm<sup>-1</sup> 근처의 흡수대의 폭이 넓은 것은 SiC/Si 계면에서 Si의 외부확산(out-diffusion)에 기인하여 Si-C 결합의 단거리 질서(short-range order)가 무너지기 때문인 것으로 판단된다. 그림 3(a)의 3440 cm<sup>-1</sup> 근처의 넓은 peak는 -OH group인데, 이는 SiC에서 Si 기판을 제거할 때 흡착된 것으로 보여진다. 2925 cm<sup>-1</sup> 근처의 peak는 C-H<sub>2</sub> anti-stretching mode들이고, 1400~1700 cm<sup>-1</sup>에서 보여지는 peak들은 C-H, C-H<sub>2</sub> 및 C-H<sub>3</sub> 결합들의 bending mode들이다.

성장된 Ga-SiC/Si의 결정 구조는 XRD로 조사되었는데, X-선 회절상을 Fig. 4에 나타냈다. X-선 회절강도를 측정하는 동안 성장된 SiC 박막은 면방향으로 회전되어 SiC grain의 어떤 결정면에서도 측정되도록 하였다. Fig. 4(a)는 Ga-도핑이 되지 않은 3C-SiC/Si(111)의 전형적인 3C-SiC 회절상으로서 4(b)의 Ga-도핑된 3C-SiC/Si의 회절상과 함께 비교되었다. 성장된 3C-SiC 에피층은 [111] 방향으로 발달되었으며, SiC(220) peak과 함께 여러 작은 peak이 나타나는데, 이는 [110] 방향 SiC grain들이 약간 존재하는 것으로 판단된다. 측정된 회절각 65° 근처의 peak은 표면에 오염된

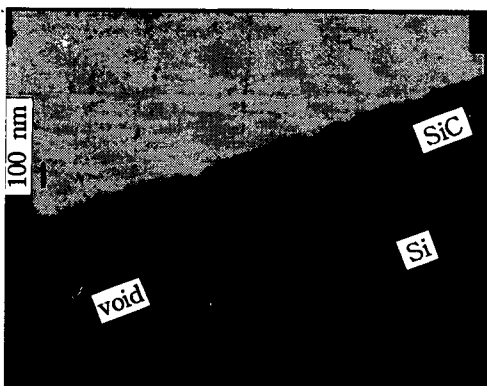


Fig. 5. Cross-sectional TEM of Ga-SiC/Si.

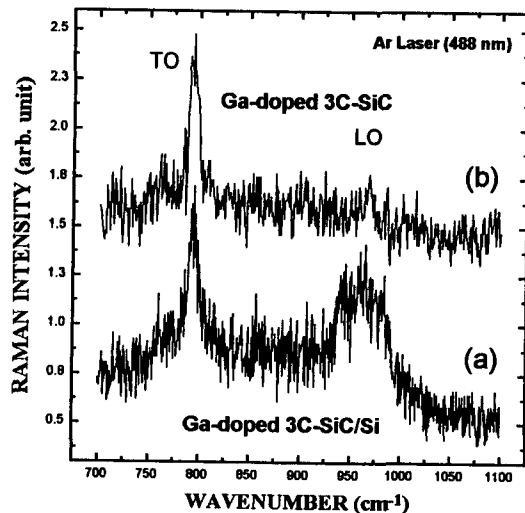


Fig. 6. Raman spectra of (a) Ga-SiC/Si and (b) Ga-doped SiC free film.

graphite carbon과 관련된 것으로 보여진다. Si 위에 SiC의 에피층 성장이 어려운 것은 SiC가 Si와 격자 부정합도가 20%이고, 열팽창계수 부정합도가 약 8%로서 차이가 매우 크기 때문인 것으로 잘 알려져 있다. Fig. 4(b)는 Ga-도핑된 SiC의 peak으로서 [111]방향으로 성장된 3C-SiC 단결정임을 나타내며, 격자상수는 4.353 Å이다. Fig. 4(b)의 36.80° 근처에 보이는 아주 작은 회절 peak은 Ga과 관련된 peak으로 보여진다. SiC 성장시 불순물로서 Ga-도핑은 SiC 단결정 성장에 유용하였다. 또한 SiC(111) peak의 반치폭(FWHM)은 훨씬 줄어들어 결정성도 향상된 것을 알 수 있다. 이는 에피층 성장 시 원자반경이 큰 Ga이 계면에서 SiC와 Si의 격자 부정합을 보완하는 것으로 보인다.

Si 위에 SiC 에피층을 성장할 때 SiC의 결정성 향상에 관한 문제 외에 SiC/Si 계면에서 Si의 외부확산으로 인한 void가 형성되어 계면 접합 및 에피층 성장을 저해하는 문제가 있다. 그림 5는 Ga-SiC/Si의 단면(cross-sectional) TEM 사진이다. 30분 동안 성장된 SiC 층의 두께는 약 300 nm이었다. Fig. 5에는 계면에서 Si가 외부 확산되어 형성된 void가 보인다. 계면에 확산된 Si의 거동은 라만 스펙트럼으로 확인할 수 있는데, Ga-SiC 박막과 Ga-SiC/Si의 라만 스펙트럼을 Fig. 6에 서로 비교하여 나타내었다. 여기(excitation) 광원은 Ar-ion Laser(488 nm)를 사용하였다. Fig. 5(a)의 Longitudinal optical(LO) mode의 넓은 peak은 기판 Si를 제거한 후 측정된 Fig. 5(b)와 비교하여 보면 계면에서 외부확산된 Si에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

SiC를 p-type 전도형으로 전환하고자 CVD로 SiC 성장 중에 Ga을 도핑하여, 불순물로서 Ga이 SiC의 결정성 및 SiC/Si 계면 특성에 미치는 영향을 조사하였다. SiC에 Ga을 도핑하면 결정성이 향상되고 단결정화(single crystallization)되는데 유익하다. 그러나 SiC/Si 계면 특성은 void가 약간 줄어들었으나 크게 개선되지는 않았다. 이중접합 SiC/Si를 이용한 전자 소자를 개발하기 위하여 Si의 외부확산에 의한 계면 반응을 억제하여 최소화하는 것이 중요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 기초과학 지원 연구소의 부분적인 측정 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] J.W. Palmour, J.A. Edmond, H.S. Kong and C.H. Carter, *Physica B* **185** (1993) 461.
- [2] K.S. Park and K.A. Lee, *J. the Korean Physical Society* **29** (1996) 225.
- [3] K.S. Park, *Physical Properties of Silicon Carbide and Device Applications* (Thesis of Doctor Degree, Dankook Univ., 1997) pp.141-153.
- [4] S. Nishino, H. Suhara, H. Ono and H. Matsunami, *J. Appl. Phys* **61**, (1987) 4889.
- [5] K. Takahashi, S. Nishino and J. Saraie, *J. of Crystal Growth* **115**, (1991) 617.