

## 화학증착 방법으로 Si (001) 기판 상에 성장된 3C-SiC 이종접합 박막의 투과전자현미경 및 라만 특성분석

김동근 · 이병택 · 문찬기\* · 김재근\* · 장성주\*\*

전남대학교 금속공학과

\*전남대학교 물리학과

\*\*동신대학교

### TEM and Raman Spectrum Characterization of 3C-SiC/Si (001) Heterostructure Grown by Chemical Vapor Deposition

D.K. Kim, B.T. Lee, C. K. Moon\*, J. K. Kim\* and S. J. Jang\*\*

Chonnam National University, Dept. of Metallurgical Engg., Kwangju 500-757,

\*Chonnam National University, Dept. of Phys.,

\*\*Dongshin University, Naju 520-714

(1997년 3월 14일 받음, 1997년 6월 23일 최종수정본 받음)

**초 록** HMDS [ $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$ ] 단일 선구체를 이용하여 화학증착 방법으로 성장된 3C-SiC/Si (001) 이종접합박막의 특성을 XRD, 라만 스펙트럼 및 투과전자현미경 (TEM) 등을 이용하여 조사하였으며 시판되고 있는 상용 3C-SiC/Si 시편을 같은 방법으로 분석하여 특성을 비교검토하였다.  $\text{C}_3\text{H}_8$ - $\text{SiH}_4$ - $\text{H}_2$  혼합가스를 선구체로 이용하여  $5\mu\text{m}$  두께로 성장된 상용 3C-SiC/Si 이종접합 박막 시료의 XRD 스펙트럼에서는 강한 3C-SiC (002) 피크만이 관찰되었으며, 라만 스펙트럼의 LO 피크는  $970\text{nm}^{-1}$  정도에서 강하게 나타났다. TEM 관찰 결과 다수의 전위, 쌍정, 적층결함 및 APB와 같은 결정결합들이 3C-SiC/Si 계면 근처에 집중적으로 분포되어 있었으며 성장된 박막은 단결정임을 확인할 수 있었다.

선구체로 HMDS를 사용하여  $0.3\mu\text{m}$  및  $2\mu\text{m}$  두께로 성장시킨 3C-SiC/Si 박막 시료의 XRD 스펙트럼은 다소 완만한 3C-SiC (002) 피크와 함께 3C-SiC (111) 피크가 관찰되었으며, TEM으로 확인한 결과 소경각 결정립들이 약  $5^\circ$ - $10^\circ$  정도 방위차를 가지고 성장하여 기둥구조(columnar structure)를 이루고 있기 때문임을 알 수 있었다. 라만 스펙트럼 분석 결과 박막의 LO 피크가  $967$ - $969\text{nm}^{-1}$  정도로 다소 낮은 wavenumber 쪽으로 이동되어 박막 내에 상당한 응력이 존재함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 HMDS 3C-SiC 박막의 특성은 성장 온도가 낮고 박막 성장용 가스로 사용한 HMDS 선구체에서 탄소가 과잉으로 공급되기 때문으로 제안되었다.

**Abstract** Cubic SiC/Si films have been analyzed by X-ray diffractometry (XRD), Raman scattering and transmission electron microscopy (TEM), grown by chemical vapor deposition (CVD) using the hexamethyldisilane [HMDS;  $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$ ] single-source precursor. A commercial wafer has been also studied, grown from the conventional propane-silane-hydrogen gas mixture. The  $5\mu\text{m}$  thick commercial SiC/Si film showed sharp (002) XRD peak and strong LO Raman peak at  $970\text{nm}^{-1}$  wavenumber. TEM observation indicated single crystal film with high density of defects originating from the interface, such as dislocations, twins, stacking faults, and anti-phase boundaries. In the case of HMDS films, XRD spectrum revealed (111) peaks mixed with (002) peaks, which suggest, the presence of misoriented crystals within the film. TEM analysis showed that the 3C-SiC films consist of columnar grains aligned along the growth direction, with  $5^\circ$ - $10^\circ$  misorientation among the SiC grains. The Raman spectrum showed the LO peaks at shifted positions of  $967$ - $969\text{nm}^{-1}$  wavenumber, due to poor crystallinity of the films. It is proposed that the degraded crystalline quality of the HMDS layers may be due to the low growth temperature and the carbon-rich nature of the growth-gas mixture.

### 1. 서 론

SiC는 제반 특성이 GaAs나 Si에 비해 우월하며 특히 열적, 화학적 안정성이 매우 뛰어나서 고온, 고속, 고용량, 내환경용 전기소자 및 청색 광원용 광소자를 제작하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다<sup>1-3)</sup>. 3C-SiC 박막을 Si 기판 상에 성장하고자 하는 노력은 안정된 고품위 SiC 기판이 공급되지 않고 있는 현재 상황에서 저렴하고 고품위인 대형

의 Si 기판을 활용할 수 있으며 Si 전자 소자들과의 집적도 가능하다는 등의 장점이 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다<sup>4-11)</sup>. 그러나 약 20% 정도의 격자부정합, 8% 정도의 열팽창계수 차이 등의 요인으로 인하여 박막 내에 높은 부정합 전위밀도, 박막의 cracking, 쌍정(twin), 적층결함(stacking fault) 및 APB(anti-phase boundary) 생성 등 반도체 이종접합구조 성장에 따른 다양한 문제점이 발생하여 이를 저감하기 위한 연구가 활발하다.

투과전자현미경(TEM; transmission electron microscopy) 및 라만 스펙트럼(Raman spectrum)을 이용한 이종접합구조의 특성 분석에 대한 연구는 접합 성장된 박막들의 결함을 감소시키기 위한 시도에 있어서 매우 중요한 작업이다. 제반 성장 조건에 있어 결함들의 밀도, 모양 및 종류 등 거동을 파악하는 것이 결함들의 밀도 조절을 위한 필수작업이기 때문이다. 3C-SiC/Si 이종접합 박막은 통상적으로  $C_2H_4/SiH_4$  및  $C_3H_8/SiH_4$  등의 두종류의 선구체를 사용하여 화학증착(CVD; chemical vapor deposition) 방법을 이용하여 성장되고 있으며 이 방법으로 성장된 박막의 구조적인 특성은 여러 가지 측면에서 분석되어 보고된 바 있다<sup>6,12~14</sup>). 그러나 비교적 최근에 연구되어 새로운 방법인 단일 선구체를 사용한 박막의 경우에 K. Takahashi<sup>9)</sup> 및 C.H. Wu<sup>10)</sup> 등이 선구체로 HMDS[hexamethyldisilane;  $Si_2(CH_3)_6$ ]를 사용하여 양질의 3C-SiC 박막을 성장하였다고 보고한 바 있으나 박막/기판 계면 및 성장 박막 내부에 존재하는 결함들의 구조적, 결정학적 특성 분석에 대한 상세한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 단일 선구체인 HMDS를 이용하여 화학증착 방법으로 성장된 3C-SiC/Si (001) 이종접합박막 시료에서 박막/기판 계면 또는 박막 내부에 존재하는 결정 결함구조, 성장된 박막의 결정배향성, 결정성 등 구조적 및 결정학적 특성을 XRD(X-ray X-ray diffractometry), 라만 스펙트럼 및 TEM 등을 통하여 고찰하였으며, 아울러 최근에 시판되고 있는 CREE 사의<sup>15)</sup> 3C-SiC/Si (001) 시료의 특성 분석을 수행하여 그 결과를 비교검토하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 상용의 Si (001) 기판 상에 단일 선구체인 HMDS를 사용하여 열 CVD 방법으로 성장된 3C-SiC/Si 박막 및 CREE 사<sup>15)</sup>에서 시판되고 있는 3C-SiC/Si 이종접합 박막을 분석하였다. 선구체로 HMDS를 사용한 CVD 성장은 RF 유도 가열 방식의 상압 수평 반응로에서 수행하였으며, 성장조건은 성장온도 1100°C, HMDS 유량 0.1scm, 수소 유량 3000scm, 성장 시간은 5분 및 30분이었고 이때 성장 박막의 두께는 각각 약 0.3 $\mu$ m과 2 $\mu$ m이었다. 이러한 성장 조건은 HMDS 선구체를 사용하여 3C-SiC 박막을 성장시킬 수 있는 적정 조건으로 알려져 있으며 이보다 고온에서 성장되는 경우 다수의 계면공동(void)이 발생한다고 보고되었다<sup>9)</sup>. 또한 CREE 사에서 시판되고 있는 3C-SiC/Si (001) 시료는 hot-wall 반응장치에서 프로판( $C_3H_8$ )과 사일렌( $SiH_4$ ) 두가지 선구체를 사용하여 통상적인 방법으로 성장되었으며 SiC 박막의 두께는 약 5 $\mu$ m이었다<sup>15)</sup>.

시료의 계면 구조 및 평면 조직을 분석하기 위해 사용한 TEM은 점분해능 0.27nm의 JEOL JEM-2000 FXII 및 점분해능 0.24nm의 JEOL 200CX 기종이었으며 모두 200kV 가속전압에서 작동하였다. 단면 TEM 시편의 제작은 두쪽의 시료를 붙여 적당한 두께로 연마한 후 이온 밀링하는 통상적인 방법을 사용하였으며, 평면 시편의 경우 Si

기판을 HF : HNO<sub>3</sub> 용액으로 선택적 에칭하고 남아 있는 SiC 박막을 적당한 두께로 이온밀링하여 TEM로 관찰하였다.

성장된 3C-SiC 박막의 결정성은 XRD(X-ray diffractometer, RIGAKU)를 이용하여 측정하였으며, 라만 스펙트럼 특성 (INOVA 304, USA)은 514.5nm의 파장을 갖는 Ar 이온 레이저를 광원으로 사용하여 상온에서 Micromate(SPEX 1482ED, USA)를 이용한 후면산란(backscattering geometry) 방식으로 측정하였고 산란된 광은 이중분광기(double spectrometer)를 사용하여 분광한 후 GaAs 광증폭기를 이용하여 검출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1(a)와 그림 1(b)는 각각 시판되고 있는 CREE사 3C-SiC/Si (001) 시료의 XRD 및 라만 스펙트럼이다. 그림 1(a)의 XRD 스펙트럼에서는  $2\theta=69^\circ$  및  $41^\circ$  근방에서 매우 좁고 강한 피크가 관찰되는데 이는 각각 기판인 Si (004) 피크와 성장 박막인 3C-SiC (002) 피크이다. 그림 1(b)는 라만 스펙트럼으로 519.5 $cm^{-1}$ 와 970 $cm^{-1}$  정도에서 강한 피크와 795 $cm^{-1}$  정도에서 다소 약한 피크가 형성되어 있는데 519.5 $cm^{-1}$ 에서의 피크는 기판인 Si에서 포논(phonon)이 회절된 피크이며 970 $cm^{-1}$  및 795 $cm^{-1}$  부근에서의 피크는 각각 3C-SiC 박막의 LO(longitudinal optical)와 TO(transverse optical) 피크이다. 이와 같이 XRD 스펙트럼에서 3C-SiC (002) 피크가 매우 예리하고 클뿐만 아니라 라만 스펙트럼에서의 LO 피크가 970 $cm^{-1}$  정도에서 강하게 관찰되는 것으로 보아 연구된 3C-SiC 박막은 결정성이 양호한 단결정으로 사료되며 이와 같은 결과는 3C-SiC/Si 이종접합박막 연구에서 양질의 박막이 성장되었다고 이미 보고된 다른 연구자들의 결과와 잘 일치된다<sup>6,14, 16~18)</sup>.

그림 1(c)와 그림 1(d)는 단면 및 평면 다중 빔 명시야(MB-BF; multi-beam bright field) TEM 영상 및 동부위의 제한시야 회절패턴(SADP; selected area diffraction pattern)을 각각 나타낸다. Si 기판과 성장된 3C-SiC 박막의 이종접합 계면은 매우 평활하며, 계면에서 다수의 전위(dislocation, D로 표시), 적층결함(stacking fault, S로 표시)과 이들을 가로지르는 APB(antiphase boundaries, A로 표시) 등 결정 결함들이 생성되어 계면 근처에 집중적으로 분포되어 있음을 알 수 있다. 단면 및 평면 제한시야 회절패턴에서 모두 강한 회절점들이 완전한 점 형태로 관찰되며 박막의 영상에서 입계가 관찰되지 않는 것으로 보아 성장된 3C-SiC 박막은 단결정임을 알 수 있으며 이는 상기의 XRD 및 라만 스펙트럼 분석 결과와 잘 일치된다.

한편 단면 및 평면 TEM 영상에서 관찰되는 APB는 비극성의 Si 기판 상에 극성의 SiC가 증착될 때 Si와 C이 우선적으로 핵생성하는 자리가 없기 때문에 Si 기판 표면에서 한쪽에서는 Si 면부터 Si-C-Si-C-의 순서로 SiC가 성장하는 반면 다른 쪽에서는 C 면부터 C-Si-C-Si-의 순서로

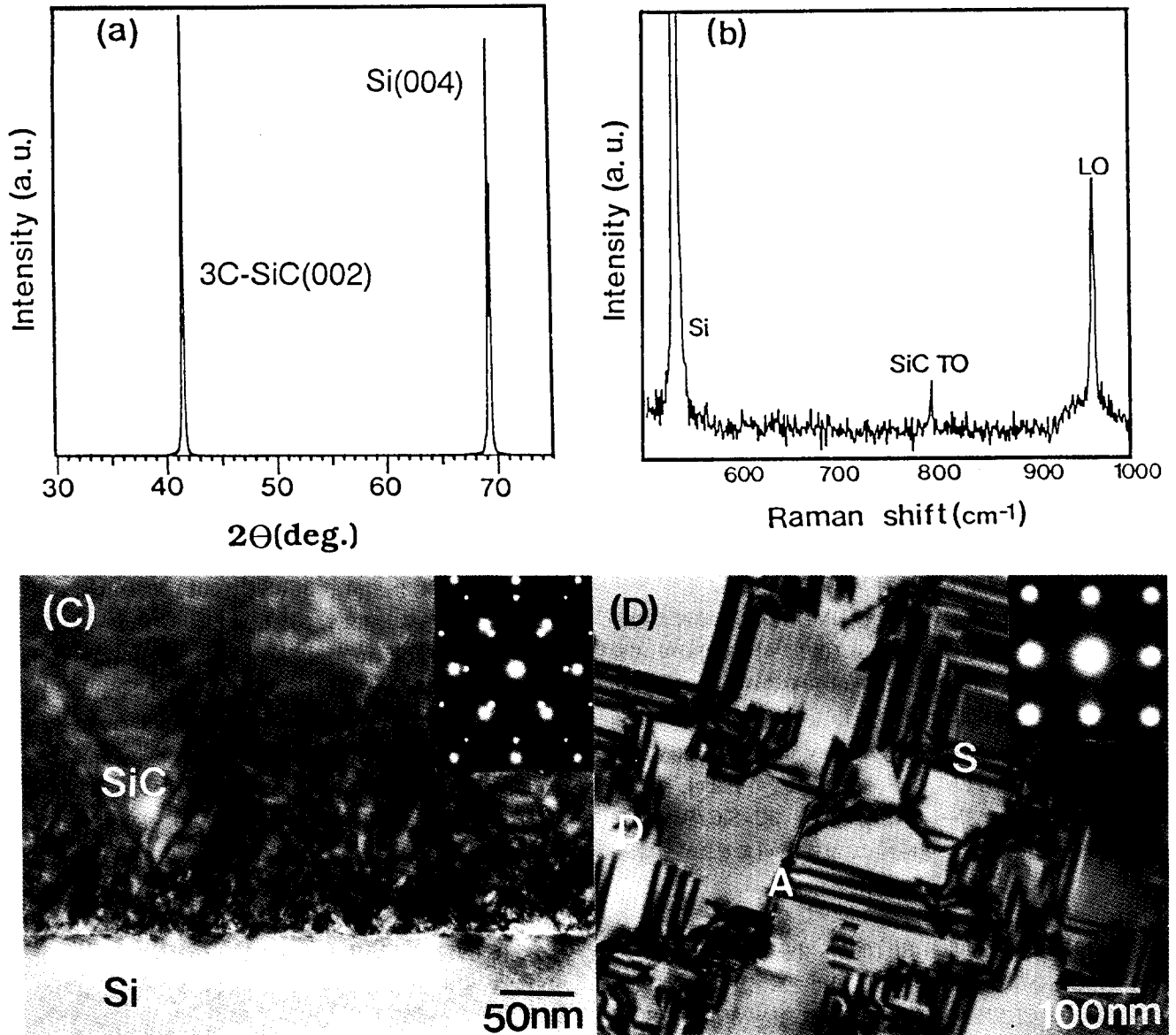


Fig. 1. Characterization results of a commercial 3C-SiC/Si (001) sample grown from  $C_3H_4$ - $SiH_4$ - $H_2$  precursors, (a) XRD spectrum, (b) Raman spectrum, (c) cross-sectional TEM BF image and the corresponding SAD pattern, (d) plan-view TEM image and the corresponding SAD pattern.

성장함에 따라 Si-Si 및 C-C 결합이 형성되어 나타나는 면결합으로 알려져 있다<sup>13)</sup>.

그림 2는 HMDS 단일 선구체를 이용하여 Si (001) 기판 상에 성장된 3C-SiC 시료의 XRD 스펙트럼으로 그림 2(a)와 그림 2(b)는 박막의 두께가 각각 0.3 $\mu$ m와 2 $\mu$ m이다. SiC 박막의 두께가 0.3 $\mu$ m인 경우에 Si 기판에서 회절된  $2\theta=69^\circ$  부근의 강한 Si (004) 피크 및 3C-SiC 결정으로부터 회절된 다소 완만한 (002) 피크와 함께  $2\theta=35.5^\circ$  부근에서 (111) 피크가 약하게 관찰된다. SiC 박막의 두께가 2 $\mu$ m인 그림 2(b)의 시료에서는 (111) 피크 세기가 0.3 $\mu$ m SiC 박막 시료인 그림 2(a)에 비해 상당히 증가하여 (111) 피크에 대한 (002) 피크 강도비  $[I(002)/I(111)]$ 가 약 0.25 정도로서 분말법(powder method)으로 무질서하게 배향된 3C-SiC 시료에서 얻어지는 강도비 0.2 (JCPDS card no. 29-1129)와 비슷하다. 이와 같이

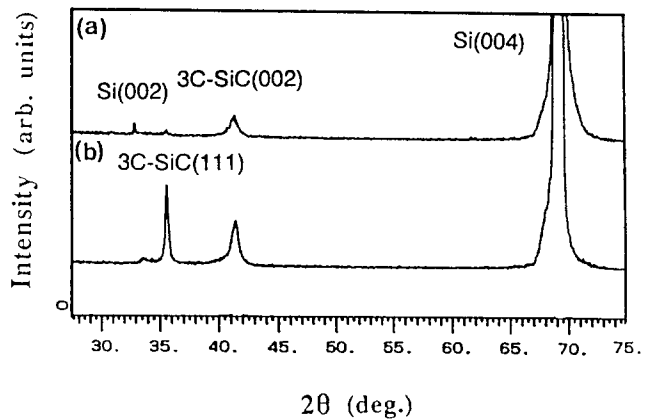


Fig. 2. XRD spectra of 3C-SiC/Si (001) samples grown from the HMDS at the condition of 1100 $^\circ$ C and HMDS/ $H_2$  flow rate of 0.1/3000, (a) 0.3 $\mu$ m SiC and (b) 2 $\mu$ m SiC.

HMDS를 사용하여 성장된 3C-SiC 박막 시료에서 3C-

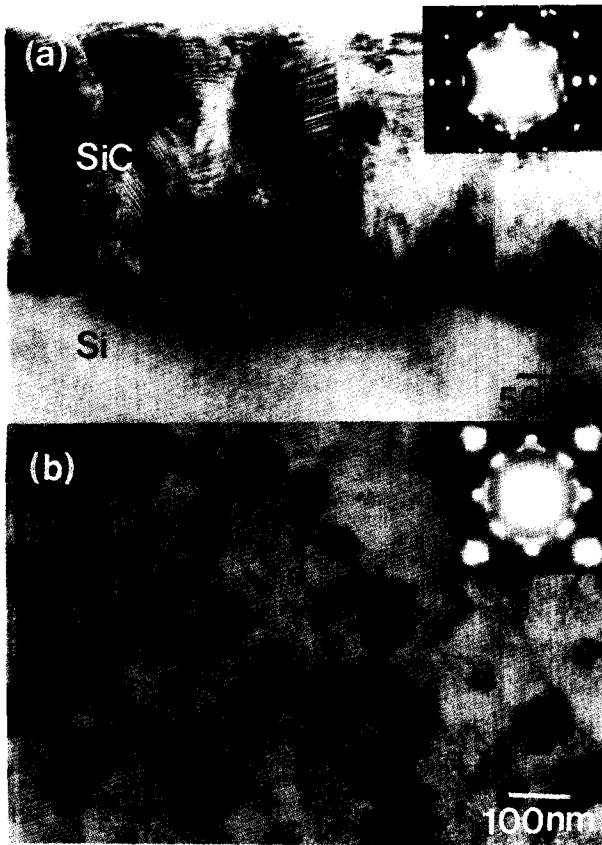


Fig. 3. BF TEM images and the corresponding SAD patterns of the 0.3 $\mu$ m HMDS sample, (a) cross-section and (b) plan-view.

SiC (111) 피크가 관찰되는 것은 성장된 3C-SiC 박막이 완전히 (002) 면으로 배향되지 않고 서로 다른 방향의 결정들이 혼합되어 있음을 의미한다.

그림 3은 0.3 $\mu$ m HMDS 3C-SiC/Si (001) 시료의 단면 및 평면 다중 빔 명시야 TEM 영상과 동 부위의 제한시야 회절패턴이다. 박막/기판의 계면은 대체적으로 평활하며 두께 또한 균일하나, 대략 50-100nm 크기의 결정립이 존재하여 기판의 (001) 방향과 거의 수직으로 기둥모양의 구조(columnar structure)를 이루고 있으며 계면 및 박막 내부에 많은 결함들이 생성되어 있어 XRD 분석과 일치된 경향을 보여주고 있다.

그림 3(a)의 제한시야 회절패턴에 있어서 회절점들이 높은 강도의 점들을 중심으로 약 5°-10° 정도 아크 모양으로 늘어나 있는 것을 알 수 있으며, 이로부터 명시야 상에서 관찰된 결정립들이 Si 결정들과 강한 선택방위관계를 보유하고 있는 한편 상호간에 약 5°-10° 정도의 방위차(misorientation)를 가지고 있는 소경각 결정립들임을 알 수 있다. 이는 그림 3(b)에 나타난 다중빔 명시야 평면 TEM 영상 및 제한시야 회절패턴에서 약 50-100nm 크기의 결정립이 관찰되며, 회절점이 약 5°-10° 정도 늘어나 있는 것과 잘 일치하고 있다. 평면 TEM 영상에 있어서도 다양한 형태의 면결합들이 줄무늬(fringe)로 관찰되며 이는 쌍정 또는 직층결합, 소경각 입계, Moire 줄무늬 등으로 사료된다.

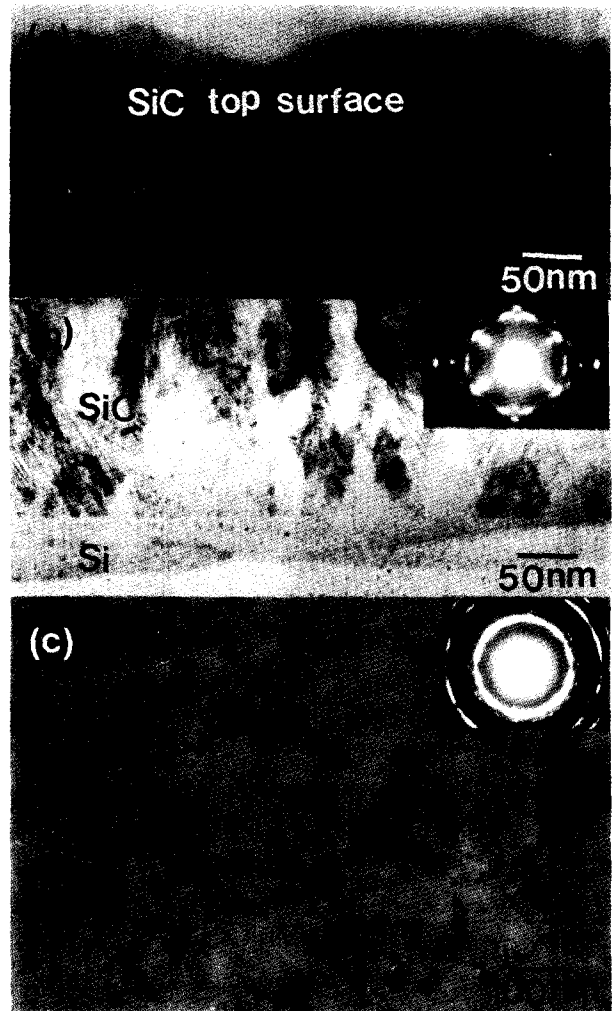


Fig. 4. BF TEM images and the corresponding SAD patterns of the 2 $\mu$ m 3C-SiC/Si sample, (a) cross-section of the SiC film nearby the surface, (b) cross-section of the SiC/Si interface, and (c) plan-view.

그림 4는 선구체로 HMDS를 사용하여 2 $\mu$ m 성장된 3C-SiC/Si(001) 시료의 단면 및 평면 다중 빔 명시야 TEM 영상 및 동 부위의 제한시야 회절패턴이다. 박막/기판 계면이 평활하고 계면으로부터 다수의 부정합전위 및 면결합들이 박막으로 전파되고 있는 양상은 그림 3과 동일하나 박막 표면에서 결정립이 상당히 조대화 되었고 박막의 우선 배향성도 거의 사라져 무질서하게 박막이 성장되었음을 알 수 있다. 제한시야 회절패턴에 있어서도 회절점들과 동시에 고리 모양의 패턴이 0.3 $\mu$ m SiC 시료(그림 3)보다 뚜렷하게 관찰되는 것으로 보아 박막 두께가 두꺼워짐에 따라 결정성은 크게 저하되어 (002) 우선 배향성이 거의 소멸되는 것으로 사료된다. 이러한 분석 결과는 그림 4(b)에 나타난 다중빔 명시야 평면 TEM 영상 및 제한시야 회절패턴에서 그림 3에 비해 결정립은 크기가 훨씬 커졌고 결정립들의 배열 역시 무질서함을 알 수 있으며, 회절점들이 구분되지 않는 거의 완전한 형태의 고리 모양으로 나타난 것에 의해 확인된다.

SiC와 Si 사이에 존재하는 20% 정도의 격자 부정합에

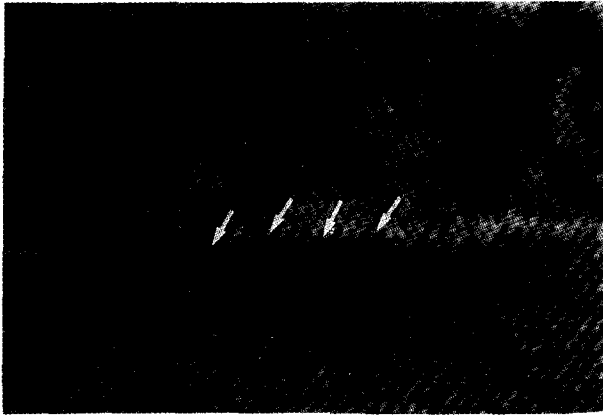


Fig. 5. A high resolution cross-sectional TEM image of am HMDS 3C-SiC/Si sample.

의한 계면 전위들은 주로 계면 부위에 집중되어 박막 내부로 전파되지 않고 있어서 저배율 단면 사진 [그림 3(a) 및 그림 4(a)]에서는 명확하게 관찰되지 않으나 그림 5에 보인 계면 부위의 고분해능 TEM 영상에서 대략 Si (111) 격자 5개 당 1개 꼴로 형성되어 있음을 (화살표로 표시) 알 수 있다. 관찰되는 대부분의 전위에 있어 부속된 잉여면이 두 종류의 {111} 면들에 모두 발생하는 것으로 보아 (각각 화살표로 표시) 이들이 분해되지 않은 완전전위인 것을 알 수 있고 이에 따라 대부분의 전위가 박막 내부로 전파되지 않고 계면에 잔류하는 것으로 생각된다.

그림 6은 HMDS 3C-SiC/Si 시료의 라만 스펙트럼으로 그림 6(a)는 두께 0.3 $\mu\text{m}$ , 그림 6(b)는 2 $\mu\text{m}$ 인 경우이다. 기관인 Si의 포논에 기인한 519.5 $\text{cm}^{-1}$  피크는 CREE 3C-SiC/Si 시료 (그림 1b)에서와 마찬가지로 강하게 형성되어 있으나 3C-SiC 박막의 LO 피크는 박막의 두께가 0.3 $\mu\text{m}$ 인 경우 969 $\text{cm}^{-1}$ , 2 $\mu\text{m}$ 인 경우 967 $\text{cm}^{-1}$  정도로 CREE 시료 및 기존의 보고에 비해 약 1 $\text{cm}^{-1}$ 과 3 $\text{cm}^{-1}$  정도 각각 다소 낮은 파수(wavenumber)쪽으로 이동되었으며 피크

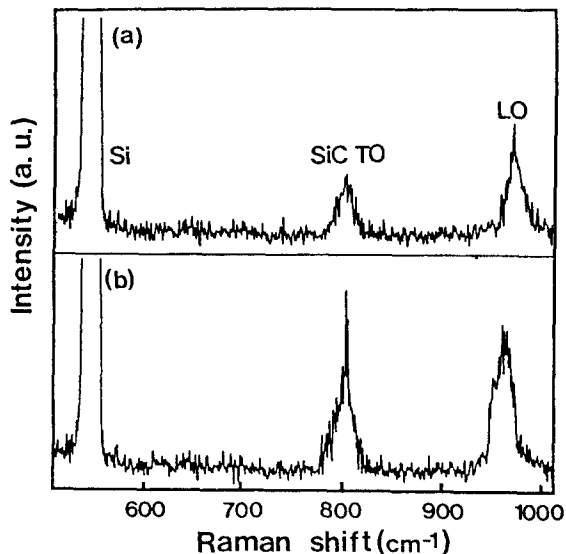


Fig. 6. Raman spectra of the HMDS 3C-SiC/Si (001) samples, (a) 0.3 $\mu\text{m}$  and (b) 2 $\mu\text{m}$  SiC.

강도 또한 감소되었음을 알 수 있다. Z. C. Feng 등은<sup>17,18)</sup> 3C-SiC/Si 이종접합박막의 라만 스펙트럼 연구에서 LO 피크의 위치 이동 및 강도 감소 원인이 성장박막 내부의 인장응력 및 박막/기관 사이의 격자상수 차이에 의한 결함의 발생 때문이며, 이를 완화시킬 수 있는 임계두께는 약 4 $\mu\text{m}$ 로 임계두께 이상에서만 강하고 예리한 피크를 관찰할 수 있었다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 관찰된 HMDS 3C-SiC/Si 시료의 박막두께가 2 $\mu\text{m}$  이하인 반면 CREE 시료의 두께가 약 5 $\mu\text{m}$ 인 점을 고려할 때 HMDS 시료의 라만 스펙트럼에서 관찰된 경향은 이 경우 성장 박막의 두께가 얇아 박막과 기관 사이의 열팽창계수 차이로 인한 인장응력 및 격자상수 차이로 인한 결함들이 충분히 이완되지 않았기 때문으로 사료된다.

본 연구의 HMDS 3C-SiC/Si (001) 박막의 성장에 있어 기둥구조의 소경각 결정립이 발생하는 원인은 박막 증착 시 저온 성장에 따라 SiC 분자의 표면 운동도가 낮고 핵생성 속도에 비해 측방향 성장 속도가 낮아서 증착되는 원자들이 성장박막의 측면에 흡착되어 단결정 박막을 형성하지 못하고 별도의 결정립을 형성하게 되기 때문으로 사료된다. 또한 성장 박막의 두께가 두꺼워짐에 따라 계면 및 박막 내부에 존재하는 다수의 미세쌍정 및 초정결함 등이 3C-SiC 성장 박막의 {111}면에 평행하게 성장하면서 (002) 우선 배향성은 더욱 감소시키고 성장 박막의 결정성을 저하시키는 것으로 보인다. Wu 등에<sup>10)</sup> 의하면 HMDS를 이용한 SiC 성장 시 박막의 품질을 개선하기 위하여 성장온도를 높이면 계면에서 공동(void)이 발생하며 이는 HMDS 선구체의 Si/C 비가 1에서 벗어나 탄소 과잉상태가 되기 때문으로 사료된다. 이에 따라 단일선구체를 이용한 SiC 박막의 성장에 있어 양질의 박막을 성장하기 위해서는 유력한 방안은 Si/C 비가 1인 선구체를 사용하거나 성장속도를 낮추는 방안이 가능하다고 사료되며 이에 대한 상세한 사항은 별도의 논문으로 보고될 예정이다.

#### 4. 결 론

HMDS 단일 선구체를 이용하여 화학증착 방법으로 Si (001) 기관 상에 성장시킨 두께 0.3 및 2 $\mu\text{m}$ 의 3C-SiC 이종접합 박막의 특성을 XRD, 라만 스펙트럼 및 TEM을 이용하여 분석하고 그 결과를 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> 혼합가스를 이용하여 성장된 상용(CREE 사) 3C-SiC/Si 시료 (두께 5 $\mu\text{m}$ )의 특성과 비교검토하였다. HMDS 3C-SiC/Si 시료의 XRD 스펙트럼은 다소 완만한 3C-SiC (002) 피크와 3C-SiC (111) 피크가 함께 관찰되었는데 이는 성장된 박막 내부에 방위차를 갖는 결정이 존재하는 것을 의미하며 단면 및 평면 TEM으로 확인한 결과 소경각 결정립들이 약 5°-10° 정도 방위차를 가지고 성장하여 기둥구조를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 라만 스펙트럼 분석 결과 3C-SiC 박막의 열악한 특성으로 인해 박막의 LO 피크가 967-969 $\text{cm}^{-1}$  정도로써 970 $\text{cm}^{-1}$  정도에서 강한 피크가 관찰된 상용 시료에 비해 다소 낮은 파수 쪽으로 이동되는 것이 관찰되어 박막 내부에 응력이 존재함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 전남대학교 자동차연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. T. Kimoto, T. Urushidani, S. Kobayashi and H. Matsunami, IEEE Elec. Device Lett. 12, 548 (1993).
2. N. S. Rebello, F. S. Shoucair and J. W. Palmour, IEE Proc.-Circuits Devices Syst. 143, 115 (1996).
3. M. L. Locatelli and S. Gamal, J. Phys. III 3, 1101 (1993).
4. S. Nishino, H. Suhara, H. Ono and H. Matsunami, J. Appl. Phys. 61, 4889 (1987).
5. A. J. Steckl and J. P. Li, IEEE Trans. Elect. Devices 39, 64 (1992).
6. O. Kordina, L. -O. Bjorketun, A. Henry, C. Hallin, R.C. Glass, L. Hultman, J. -E. Sundgren, E. Janzen, J. Cryst. Growth 154, 303 (1995).
7. J. A. Powell, L. G. Matus and M. A. Kuczmariski, J. Electrochem. Soc. 134, 1558 (1987).
8. Y. H. Seo, K. S. Nahm, E. K. Suh, Y. H. Lee, H. J. Lee and Y. G. Hwang, Technical Dogest, Proc. Int. Conf. SiC. Rel. Mat. 1995, Kyoto, Japan, p336.
9. K. Takahashi, S. Nishino and J. Saraie, J. Electrochem. Soc. 139, 3565 (1992).
10. C. H. Wu, C. Jacob, X. J. Ning, S. Nishino and P. Pirouz, J. Cryst. Growth 158, 480 (1996).
11. A. J. Steckl, C. Yuan, J. P. Li and M. J. Loboda, Appl. Phys. Lett. 63, 3347 (1993).
12. C. H. Carter, Jr., R. F. Davis and S. R. Nutt, J. Mat. Res. 1, 811 (1986).
13. P. Pirouz, C.M. Chorey and J.A. Powell, Appl. Phys. Lett. 50, 221 (1987).
14. J. Stoemenos, C. Dezaudier, G. Arnaud, S. Contreas, J. Camassel, J. Pascual and J.L. Robert, Mat. Sci. Eng. B29, 160 (1995).
15. CREE Research Inc., 2810 Meridian Parkway, Durham, NC 27713.
16. Q. Wahab, L. Hultman, J. -E. Sundgren and M. Willander, Mat. Sci. and Engg., B11, 61 (1992).
17. Z. C. Feng, A. J. Mascarenhas, W. J. Choyke and J. A. Powell, J. Appl. Phys. 64, 3176 (1988).
18. Z. C. Feng, W. J. Choyke and J. A. Powell, J. Appl. Phys. 64, 6827 (1988).