

## SOD 구조 형성에 따른 다이아몬드 박막 형성

고정대 · 이유성 · 강민성 · 이광만\* · 이개명\*\* · 김덕수\*\*\* · 최치규

제주대학교 물리학과

\*전자공학과

\*\*전기공학과

\*\*\*화학과

### Formation of the Diamond Thin Film as the SOD Structure

Jeong Dae Ko, You Seong Lee, Min Sung Kang, Kwang Man Lee\*,

Kae Myoung Lee\*\*, Duk Soo Kim\*\*\* and Chi Kyu Choi

Department of Physics

\*Department of electronic Engineering

\*\*Department of Electrical Engineering

\*\*\*Department of Chemistry, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

(1998년 8월 23일 받음, 1998년 10월 9일 최종수정본 받음)

**초 록** CO와 H<sub>2</sub>의 탄소원을 사용한 마이크로파 플라즈마 화학기상증착 방법으로 SOD 구조에 적용될 양질의 다이아몬드 박막을 형성하였고, SOD구조를 형성하기 위해 diamond/Si(100) 구조 위에 poly-Si 박막을 저압화학기상 증착법으로 제작하였다. CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비 증가에 따라 다이아몬드의 결정은 octahedron구조에서 cubo-octahedron 구조로 바뀌었으며, 결정면은 {111}과 {100}으로 혼합되어 형성되었다. 비정질 carbon과 non-diamond 성분이 없는 양질의 다이아몬드 박막은 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18일 때 형성되었으며, 주 결정상은 {111} 면이었다. diamond/Si(100) 계면은 void가 없는 평활한 계면을 이루었으며, 다이아몬드 박막의 유전상수, 누설전류와 비저항은 각각 5.3,  $1 \times 10^{-9} \text{A/cm}^2$  그리고  $9 \times 10^7 \Omega \text{cm}$ 이었다.

**Abstract** High quality diamond films of the silicon on diamond (SOD) structure are deposited using CO and H<sub>2</sub> gas mixture in microwave plasma chemical vapor deposition (CVD), a SOD structure is fabricated using low pressure CVD polysilicon on diamond/ Si(100) substrate. The crystalline structure of the diamond films which composed of {111} and {100} planes, were changed from octahedral one to cubo-octahedron one as the CO/H<sub>2</sub> ratios are increased. The high quality diamond films without amorphous carbon and non-diamond elements were deposited at the CO/H<sub>2</sub> flow rate of 0.18, and the main phase of the diamond films shows {111} plane. The diamond/Si(100) structure shows that the interface is flat without voids. The measured dielectric constant, leakage current and breakdown field were 5.3,  $1 \times 10^{-9} \text{A/cm}^2$  and  $9 \times 10^7 \Omega \text{cm}$ , respectively.

### 1. 서 론

다이아몬드 박막이 화학기상 증착법으로 형성 가능함에 따라 반도체, 고온 고주파, 광전자 그리고 wide band gap의 특성에 따른 각종 센서 등의 소자에 적용하려는 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>1-3)</sup> 특히 다이아몬드 박막은 유전상수가 낮고, 열전도율이 우수하여 소자의 heat sink 물질로 응용 가능성이 규명되어 집적회로 소자와 전력소자에서 SOI(silicon on insulator) 구조의 SiO<sub>2</sub> 절연층 대신 다이아몬드 박막을 사용한 SOD(silicon on diamond)구조로 바꾸면 열전도성(100℃에서 Cu의 3배)과 내열성이 우수하여 소자의 특성이 향상될 것으로 알려지고 있다.<sup>4)</sup> 이 구조를 제작하는데 있어서 가장 중요한 것은 평활한 계면을 갖는 epi-Si/diamond/poly-Si 구조와 절연 특성이 우수한 다이아몬드 박막을 형성하는 것이다. 일반적으로 다이아

몬드 박막의 표면에 나타날 수 있는 가능한 결정면은 {111}, {110}, {311}, {331}과 {100} 등이며, 특히 {100} 면은 매끈한 표면을 가질 뿐만 아니라 박막이 평행하게 성장한다.<sup>5-8)</sup> 화학기상 증착 방법에 의하여 형성되는 다이아몬드 박막은 기판의 조건, 반응가스, 기판온도 및 형성방법 등에 따라 그 특성이 다양하게 나타나며,<sup>9-13)</sup> 최근에는 다이아몬드 박막이 성장함에 따라 박막 표면이 일정한 방향의 morphology를 나타내는 texture 구조 성장에 대한 연구가 시도되고 있다.<sup>9)</sup> 한편 다이아몬드 박막의 에피택셜 성장은 다이아몬드 기판이나 BN 기판 위에서 극히 제한된 범위 내에서 극소적으로 진행됨이 보고되고 있으나 소자 응용을 위한 Si 기판 위에서는 에피택셜 성장에 성공하지 못하고 있다.<sup>14,15)</sup> 이것은 화학기상성장법으로 다이아몬드 박막을 증착할 경우 탄소원에 의하여 hydrocarbon, 흑연, 비정질 탄소 등과 같은 nondiamond 성분이 상당량 박막 내

부에 포함되기 때문이다.<sup>16~18)</sup>

다이아몬드 박막을 증착하는 방법 중 마이크로 플라즈마 화학증착법(microwave plasma enhanced chemical vapor deposition : MWPECVD)은 저온 플라즈마로서 고 밀도 플라즈마를 가지며, 이온 에너지가 높고, 반응가스를 충분히 해리시킬 수 있다는 잇점 때문에 다이아몬드 박막 합성에 많이 이용되고 있다. CO/H<sub>2</sub> 다이아몬드 박막을 형성할 경우 평활한 표면을 갖는 homoepitaxial 다이아몬드 박막이 되어 표면처리에 대한 새로운 모델이 제시되고 있다.<sup>19, 20)</sup>

본 연구에서는 SOD 구조 형성에 따른 양질의 다이아몬드 박막을 CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비 변화에 따라 마이크로 플라즈마 증착법으로 형성시키고, 형성된 다이아몬드 박막의 결정상을 X-선 회절법과 Raman 분광법을 이용하여 조사하였으며, 표면 morphology, 계면상태와 거칠기는 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope : FESEM)과 원자력간 현미경(atomic force microscope : AFM)로 분석하였고, SOD 구조가 형성된 박막에 대해 유전상수와 비저항 등의 전기적 특성을 조사하여 절연 상태에 따른 소자로의 이용 가능성을 알아보았다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용한 기판은 비저항이 5~10 $\Omega$ cm인 p형 Si(100) 웨이퍼로 크기는 5인치였다. 다이아몬드 박막을 증착하기 전에 Si 기판을 표준세척 공정에 따라 처리하여 기판 표면의 불순물과 산화막을 완전히 제거하였다. 다이아몬드 박막형성에 따른 기판은 20~30 $\mu$ m 크기의 다이아몬드 분말을 아세톤 용액에 넣어 초음파 세척기로 30분간 표면 처리한 후 웨이퍼를 buffered oxide etchant(BOE) 용액에 약 10초간 담가, 탈 이온된 2차 증류수로 세척한 후 건조한 질소로 말린 다음 마이크로 웨이브 화학기상 증착장치 반응로에 장착하였다. 반응로의 초기 진공도를  $\sim 10^{-7}$  Torr로 한 다음 H<sub>2</sub>+CO의 총 유량이 100 sccm 되도록 H<sub>2</sub>와 CO의 유량을 변화시키면서 증착하였다. 다이아몬드 박막의 증착은 3~5시간 하였고, 증착 중 반응로의 진공도는 약 30mTorr가 유지되도록 throttle valve에 의하여 자동제어 되도록 하였다. 기판의 온도가 800 $^{\circ}$ C로 도달했을 때 H<sub>2</sub> 가스를 주입시킨 다음 최종적으로 기판의 온도가 900 $^{\circ}$ C에서 일정하게 유지될 때 탄소원 가스를 주입하고, 플라즈마를 발생시켰다. 이 때 마이크로파의 전력은 350 W로 인가하였으며, 각 반응 조건에 따라 tuner를 조절하여 플라즈마의 상태를 제어하였다. 이 때 반응가스는 99.99% 이상의 고순도를 사용하였고, 기판의 온도는 플라즈마 상태에서 IR optical pyrometer(Minolta IR630)로 제어하였다. poly-Si의 박막 형성은 LPCVD방법을 이용하여 다이아몬드 박막 표면에 약 0.6 $\mu$ m로 증착하였다.

형성된 다이아몬드 박막의 결정상과 상전이 현상은 박막 측정용 XRD(Rigaku D/MAX-RC)를 사용하여 분석하였다. X-선원은 Ni 필터를 통하여 얻은 CuK $\alpha$ 로 그 파장은 0.154nm이었고, 필라멘트 전류는 20mA, 가속전압은

45kV이었다. Full scale 은 5 $\times 10^4$ cps로 하였으며, 주사 영역은 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standard) 카드 상에 나타나 있는 다이아몬드 박막의 스펙트럼 분포를 고려하여 2 $\theta$ 를 40 $^{\circ}$ 에서 95 $^{\circ}$ 의 범위로 하였다. 다이아몬드 입자상에 대한 분석은 488 nm의 Ar laser를 사용한 micro Raman spectroscopy(Jobin Yvon, U1000)를 이용하였다. 여기서 laser의 전력은 120mW, scan 영역은 1000~1700cm<sup>-1</sup>의 범위에서 scanning step을 2cm<sup>-1</sup>로 측정하였다. 그리고 SOD 구조에서의 표면상태, 결정상 및 핵 형성 상태, 계면상태 그리고 두께 등을 FESEM(Hitachi S-800)으로 조사하였고, 이 때 입사 전자비입의 가속전압은 10kV, 배율은 20,000배에서 50,000배로 하였다. atomic-level에 따른 다이아몬드/Si(100) 구조의 표면과 기판 Si가 완전히 etching된 다이아몬드 박막의 뒷면의 표면상태를 AFM(CP-100, PSIA)으로 조사하였고, 이로부터 표면의 거칠기를 조사하였다. 다이아몬드 박막의 두께는 Ellipsometry(L116D, Gaertner)로 측정하였다. 박막의 균일도는 wafer의 가장자리로부터 0.6cm 내의 영역에서 상하좌우로 9개의 point를 선택하여 측정하였다. 다이아몬드 박막의 유전율, 누설전류, dielectric breakdown voltage 등의 전기적 특성은 C-V, I-V 측정방법에 의해 주파수, 인가전압, 전기용량 등으로부터 측정하였다. 이 특성 조사를 위해 다이아몬드 박막을 MIS 구조로 형성하였으며, 전극은 Au로 증착하였고, 상부전극에는 Pt 탐침을 이용하여 오염성 접촉이 되도록 하였으며 전극 단면적은 2.5 $\times 10^{-3}$ cm<sup>2</sup> dot 마스크를 이용하여 patterning 하였다. I-V 특성조사에서 시료에 대한 인가전압은 0V에서 100V까지 인가하였고, 누설전류의 밀도는 3V의 인가전압에서 측정하였다. C-V 특성조사에서는 인가전압을 -20V에서 +20V 범위 내에서 측정하였고, 박막의 비저항은 4-point probe 방법으로 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

다이아몬드 박막의 결정성, 핵형성 밀도, 결정립의 크기, 그리고 표면 morphology 등은 반응로의 플라즈마 변수, 기판온도, 증착시간과 탄소원의 종류, 그리고 유량비 등에 영향을 받는다. 일반적으로 마이크로 플라즈마 화학 기상 증착법에 의한 다이아몬드 박막의 증착은 플라즈마 상태에서 활성화 에너지와 탄소원의 유량비에 따라 결정성이 다르게 나타난다.<sup>1, 7)</sup> 따라서 본 연구에서는 먼저 다이아몬드 박막의 결정성을 유량비 변화에 따른 XRD 스펙트럼으로 분석하였다. 그림 1은 CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비를 각각 0.11, 0.18, 그리고 0.25가 되도록 주입하면서 5시간 증착시킨 다이아몬드 박막에 대한 XRD 스펙트럼이다. 2 $\theta$ 가 43.9 $^{\circ}$ , 75.3 $^{\circ}$ 와 91.4 $^{\circ}$ 에서 나타난 피크는 다이아몬드 박막의 (111), (220)와 (311)면에 대한 회절스펙트럼으로서 유량비에 관계없이 동일한 회절면만 나타났으나 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 증가함에 따라 (111)면의 피크강도는 상대적으로 증가하였고, 주 결정면은 (111)임을 알 수 있다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.11이 되도록 증착한 시료의 (111)면에 대한 선

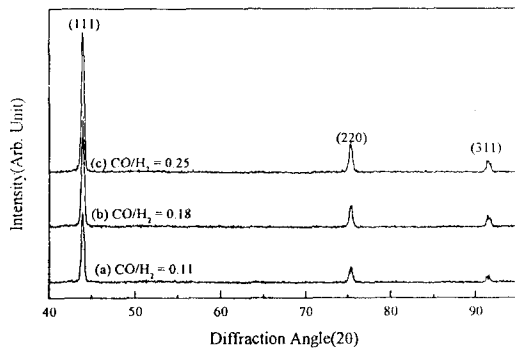


Fig. 1. XRD spectra of the diamond films deposited as function of the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases. (a) CO/H<sub>2</sub> = 0.11, (b) CO/H<sub>2</sub> = 0.18, and (c) CO/H<sub>2</sub> = 0.25.

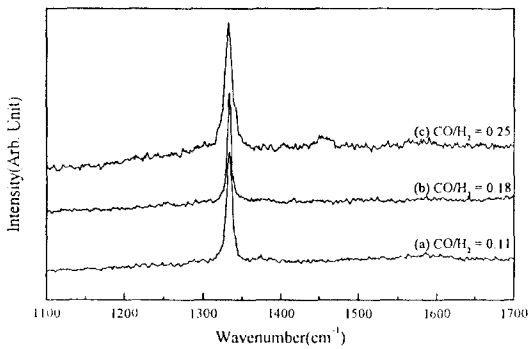


Fig. 2. Raman spectra of the diamond films deposited as function of the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases. (a) CO/H<sub>2</sub> = 0.11, (b) CO/H<sub>2</sub> = 0.18, and (c) CO/H<sub>2</sub> = 0.25.

백적 배향, 결정립의 크기, 그리고 격자의 strain은 각각 71.2%, 26nm와 0.23%이었고, 결정상의 (111), (220)과 (311)면에 대한 피이크 강도는  $I_{111} : I_{220} : I_{311} = 100 : 22 : 9$ 로 나타났다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18이 되도록 증착한 시료의 (111)면에 대한 선택적 배향, 결정립의 크기와 격자의 strain은 각각 74.1%, 36nm와 0.16%이었고, 다이아몬드 결정상의 (111), (220)과 (311)면에 대한 피이크 강도는  $I_{111} : I_{220} : I_{311} = 100 : 20 : 8$ 로 나타났다. 또한 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.25가 되도록 증착한 시료의 각 면들에 대한 회절 피이크의 강도비는  $I_{111} : I_{220} : I_{311} = 100 : 23 : 8$ 로 비슷하게 나타났으며, (111)면에 대한 선택적 배향, 결정립의 크기와 격자의 strain은 각각 69.3%, 25nm와 0.23%로 계산되었다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18인 시료의 (111)면에 대한 결정립의 크기는 36nm이었으나 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.25인 시료에서는 25nm로 감소한 것은 기판표면에서 탄소원의 과다에 의해 non-diamond 성분이 증가되는 것으로 생각된다.<sup>21)</sup> 따라서 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18인 시료에서 (111)면에 대한 결정립의 크기가 커지고 방향성이 우수해진다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 그림 1의 시료에 대한 Raman 스펙트럼이다. 이들 시료에서 1332cm<sup>-1</sup> 영역에 강하게 나타난 스펙트럼은 다이아몬드에 대한 고유 피이크를 나타낸다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.11 그리고 0.25로 증착한 시료에서는 1450 cm<sup>-1</sup> ~ 1600 cm<sup>-1</sup> 영역에서 미세한 non-diamond 성분을 나타

내는 피이크가 관측되었으나 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18로 증착한 시료에서는 non-diamond 성분을 나타내는 피이크가 관측되지 않았다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18인 시료에서 다이아몬드의 전형적인 피이크(1332cm<sup>-1</sup>)의 강도(ID)는 최대가 되었으나 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.25인 시료에서는 1332cm<sup>-1</sup>에서 나타난 피이크의 강도가 감소되었고, non-diamond의 피이크(1500cm<sup>-1</sup>)와의 강도비(ID/IN)는 증가되었으며, 1332cm<sup>-1</sup>에서 나타난 다이아몬드 피이크의

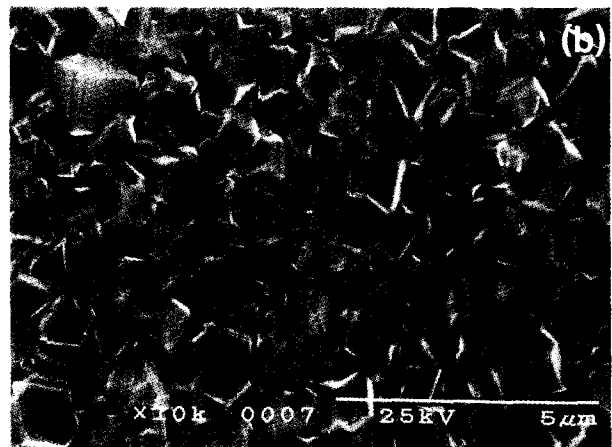
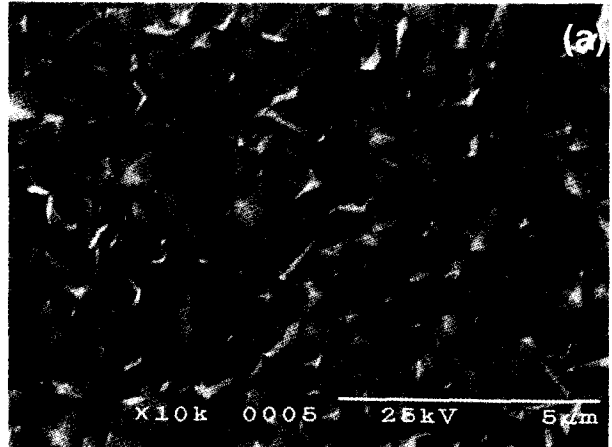


Fig. 3. SEM morphology of the diamond films deposited as function of the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases. (a) CO/H<sub>2</sub> = 0.11, (b) CO/H<sub>2</sub> = 0.18, and (c) CO/H<sub>2</sub> = 0.25.

반치폭이 커졌다. 이것은 박막 형성시 주입된 탄소원의 농도과다로 non-diamond에 대한 수소 원자의 etching 속도가 감소되기 때문이며 격자결함을 유발하는 non-diamond 성분이 증가되어 격자 내의 무질서(lattice disorder) 정도 및 격자 뒤틀림(lattice distortion) 정도가 많은 박막으로 형성되었다는 것을 의미한다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18인 시료에서의 반치폭 값은 약 6.6cm<sup>-1</sup>로 측정되었다. 이것은 천연 다이아몬드와 인조 단결정 다이아몬드의 Raman 스펙트럼의 반치폭 값 약 1.9cm<sup>-1</sup>과 6.7~7.5cm<sup>-1</sup>과 비교하여 볼 때 양질의 단결정으로 증착되었다는 것을 알 수 있다. 그러나 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 각각 0.11과 0.25가 되도록 증착한 시료에서의 반치폭 값은 8.1cm<sup>-1</sup>와 11.8cm<sup>-1</sup>으로 주어졌다. 이것은 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.25인 시료에서는 탄소원의 농도증가에 의해 흑연의 생성이 조장되지만 기상에 존재하는 원자상 수소의 상대적인 양이 감소하므로 원자상 수소에 의하여 다이아몬드와 non-diamond 성분의 제거속도가 감소하여 non-diamond 박막에 대한 피이크가 나타나는 것으로 생각된다. Wang 등<sup>22)</sup>은 CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비를 0.1로 했을 때 형성된 다이아몬드 박막에 대한 반치폭이 14~19cm<sup>-1</sup>로 주어졌고, 1420cm<sup>-1</sup> 영역에서 강도가 큰 non-diamond 성분을 나타내는 피이크가 관측되었다. 따라서 그림 2의 (a)와 (b)의 결과와 비교하면 본 연구에서 형성된 다이아몬드 박막은 우수한 것으로 생각된다.

그림 3은 CO/H<sub>2</sub>의 유량비에 따른 다이아몬드 박막의 표면 morphology를 나타낸 것이다. CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.11이 되도록 증착한 시료 표면의 morphology는 {111}면이 잘 발달된 octahedron 구조의 뾰기 형태로 되어 있고, 다이아몬드 결정의 크기는 약 0.3μm에서 1μm로 성장되어 있으며 표면은 {111}면 방향에 의하여 평탄화되어 있지 않다(그림 3-(a) 참조). 그러나 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18이 되도록 증착한 시료의 표면은 {111}면을 갖는 octahedron 구조가 관측되지 않았고, 모두 cubo-octahedron 구조로 {100}의 texture 방위를 가지면서 {111}과 {100}면이 혼합되어 있으며, 그림 3-(a)보다 {100}면이 더 잘 발달되어 있고, 일부에서는 {100}면만 갖는 cube 구조가 나타나기도 하였다(그림 3-(b) 참조). 표면 morphology는 그림 3-(a) 보다는 평탄화된 상태를 보여주고 있으며, 다이아몬드 결정의 크기는 약 0.5μm에서 1.5μm 정도이다. 그림 3-(c)는 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.25가 되도록 증착한 다이아몬드 박막의 표면 morphology를 보여주고 있다. 결정성은 그림 3-(b)와 비슷하나 국부적으로 잘 발달되지 않은 다이아몬드 결정이 약간 혼합되어 있다. 이상의 SEM 결과로부터 다이아몬드 박막의 성장 방향은 기상 중의 반응활성종 농도에 따라 성장 초기에 핵 형성이 선택적 배향면을 갖는 것으로 생각된다.<sup>23)</sup>

그림 4는 CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비에 따른 다이아몬드 박막의 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 이 때 scan size는 2.5μm×2.5μm로 하였다. AFM으로 측정된 다이아몬드 박막의 표면은 SEM의 결과와 비슷한 삼각형 돌기 형태였고, 결정의 크기는 약 1μm이었으며, 높이는 약 50nm에서

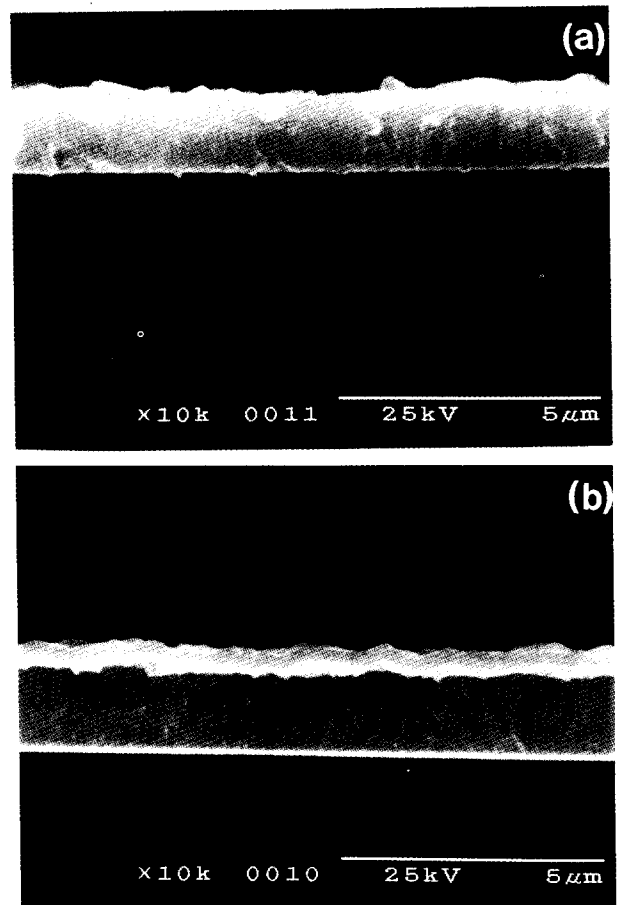


Fig. 4. SEM cross-section, (a) diamond/Si(100) structure, and (b) poly-Si/diamond/Si(100) structure.

130nm 이었다. CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비가 0.11인 시료에서의 표면 거칠기는 7.43nm 이었고, 유량비가 0.18일 때에는 1.86nm로 감소되었으나 유량비가 0.25일 때에는 3.74nm로 증가하였다. CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비가 0.18로 증가할 때까지 표면의 거칠기가 감소한 것은 다이아몬드 박막의 결정이 농도가 증가할수록 입자형상이 octahedron에서 cubo-octahedron을 거쳐 구상으로 변화한 것이며, 그 이상 유량비를 증가할 경우에는 cubo-octahedron의 결정이 커져서 표면의 거칠기가 증가한 것으로 생각된다. 이러한 거칠기의 변화는 탄소원의 유량이 증가함에 따라 다이아몬드의 결정 구조가 8면체구조에서 6면체구조로 변화하기 때문이다.<sup>24)</sup> 이상의 결과로부터 CO/H<sub>2</sub> 탄소원에 의하여 SOD 구조에 적합한 다이아몬드 박막의 형성조건은 CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비가 약 0.18때임을 알 수 있다.

SOD 구조형성에서 가장 중요한 것은 diamond/Si와 poly-Si/diamond 구조의 계면이다. 다이아몬드 박막과 LPCVD 방법으로 형성된 poly-Si 박막을 이용하여 구성된 계면을 SEM으로 분석하여 SOD 구조에 대한 계면특성을 조사하였다. 이 구조에서 다이아몬드 박막은 XRD, Raman Spectroscopy와 SEM의 morphology의 결과에 따라 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18이 되도록 증착한 시료를 사용하였다. 그림 5-(a)는 diamond/Si 구조에 대한 SEM

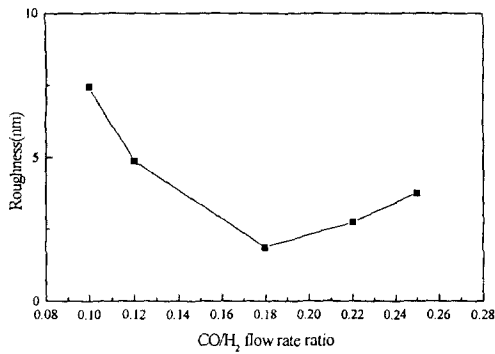


Fig. 5. The roughness of the diamond films deposited as function of the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases.

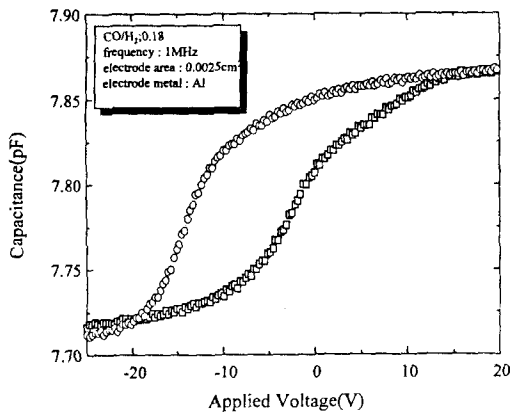


Fig. 6. C-V characteristics of the diamond film deposited at the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases as CO/H<sub>2</sub> = 0.18.

단면사진을 나타낸 것이다. 다이아몬드 박막은 약 2 $\mu$ m의 두께로 주상형태로 증착되어 있으며, 계면은 아주 평활하였고, 계면과 입자들 사이에는 void가 형성되어 있지 않았다. 다이아몬드 입자들은 다면체 (polyhedra) 이므로 입자들 사이 또는 계면에서 void가 형성될 수 있으나 조밀한 박막의 경우에는 void가 나타나지 않는다. 따라서 그림 5-(a)의 결과로 보아 형성된 다이아몬드 박막은 적층 상태가 우수하다는 것을 알 수 있다. 그림 5-(b)는 그림 5-(a)의 시료에 poly-Si을 증착한 SOD구조의 SEM 단면 사진이다. 측정된 다이아몬드 박막과 poly-Si의 두께는 증착된 값과 거의 비슷하였다. poly-Si/diamond 구조에서의 계면은 평탄치 않았고, 다이아몬드 입자와 입자들 사이에 함몰된 부분에 poly-Si가 채워져 있는 것을 볼 수 있으며, 계면에서의 void는 관찰되지 않았다. 여기서 계면이 평탄치 않은 것은 다이아몬드 박막의 표면 morphology에 의한 것이다. 최근 bonding and etchback SOD (BESOD)에 의한 방법 등이 많이 제시되고 있으나<sup>25)</sup> anodic bonding에 의한 Si(100)/SiO<sub>2</sub>/diamond/Si(100) 구조에서 SiO<sub>2</sub>/diamond 계면상태가 우수하지 않는 것으로 볼 때 LPCVD 방법에 의하여 diamond/Si(100) 기판 위에 poly-Si 박막을 형성하는 것이 더 우수한 SOD 구조라고 생각된다.

SOD 구조에서 다이아몬드 박막이 우수한 절연특성을 갖기 위해서는 유전상수가 낮아야한다. 따라서 형성된 다이아

몬드 박막은 C-V와 I-V 특성 조사로부터 유전상수, 누설 전류, breakdown voltage 등을 조사하였다. 이 때 전극의 단면적은 0.0025cm<sup>2</sup>가 되도록 dot 마스크를 이용하였다. 그림 6은 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18이 되도록 주입하면서 4시간 증착시킨 다이아몬드 박막에 대해 주파수는 1 MHz, 인가전압은 -20V에서 20V까지 걸어 주었을 때 측정된 C-V 특성곡선이다. 이 때 사용된 시료의 두께는 약 1.5 $\mu$ m이었다. 측정된 정전용량의 최대값은 약 7.87pF로써 계산된 유전상수 값은 5.3으로 주어졌다. C-V 특성 측정시 sweep up과 down 과정 동안 diamond/Si 계면에서 전하가 축적된다. 따라서 계면영역에 존재하는 전하밀도의 분석은  $N_i = (C_a V_h) / (qA)$  식에 의하여 sweep up과 down에서 일어나는 hysteresis 곡선의 전압폭으로부터 계산된다. 여기서 C<sub>a</sub>는 측정영역의 정전용량, V<sub>h</sub>는 sweep up과 down에서 일어나는 hysteresis 곡선의 전압폭, q는 단위전하량 그리고 A는 전극의 단면적이다. 이들 식으로부터 계산된 전하밀도는 8.2 $\times 10^{14}$ cm<sup>-2</sup>으로 주어졌다. 이 전하밀도는 낮은 값으로써 전기장에 의한 분극현상이 잘 일어나지 않는다. 여기서 측정된 유전상수 값은 일반적으로 알려진 다이아몬드 유전상수 값 5.5~5.7과 보고된 gate-diamond-silicon capacitor 구조<sup>26)</sup>에서의 유전상수 6.0보다 낮은 값이며, SOI 구조에서 사용되고 있는 SiO<sub>2</sub> 박막의 유전상수 약 4.5보다는 약간 높은 값이다. 따라서 본 연구에서 제작된 다이아몬드는 우수한 절연체임을 알 수 있으며, 집적회로 소자에 SOD 구조로의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 그림 6의 시료에 대한 I-V 특성곡선을 나타낸 것이다. 인가한 전압영역에서는 누설현상과 breakdown 현상이 나타나지 않았으며, 누설전류의 밀도는 약 1 $\times 10^{-9}$ A/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다. 인가전압이 약 58V에서 약 2 $\times 10^{-7}$ A의 전류로 일정한 값을 가지는 것은 측정장비에서 전류제한치 설정에 의한 것이다. 그러나 I-V측정시 인가전압을 100V까지 걸어 주어도 breakdown 현상이 일어나지 않는 것으로 보아 다이아몬드 박막은 핀-홀이 없이 모두 결정화되었고, breakdown field는 약 1MV/cm 이상인 것으로 생각된다. 이와 같은 유전상수, 전하밀도, 누설전류밀도 및

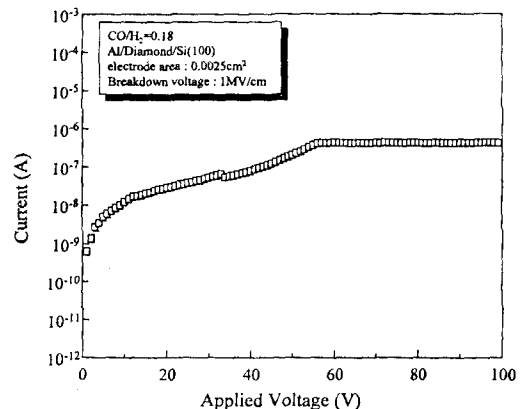


Fig. 7. I-V characteristics of the diamond film deposited at the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases as CO/H<sub>2</sub> = 0.18.

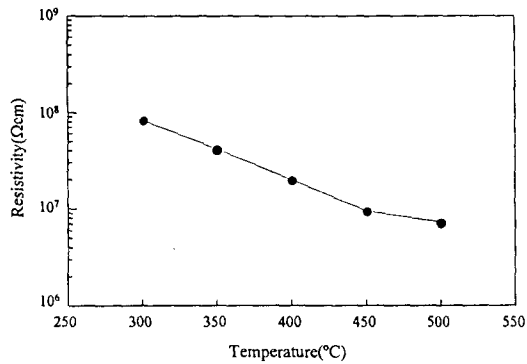


Fig. 8. Resistivity of the diamond films deposited as function of the flow rate ratio of CO and H<sub>2</sub> mixture gases.

breakdown field는 CO/H<sub>2</sub> 탄소원 유량비에 관계없이 거의 일정하였다. 그림 8은 그림 6의 시료에 대한 다이아몬드 박막의 온도에 따른 비저항을 나타낸 것이다. 실온에서는 비저항이 약  $9 \times 10^7 \Omega\text{cm}$ 이었으나 온도가 증가함에 따라 감소하여 500°C에서는 비저항이 약  $7.2 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ 로 주어졌다. 실온에서 측정된 비저항도 그림 7의 결과와 같이 탄소원의 유량비에 관계없이 비슷한 값으로 주어졌다. 이상의 전기적 특성 분석으로부터 다이아몬드 박막은 SOD 구조에서 우수한 절연층으로 이용 가능하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

SOD 구조형성에 따른 다이아몬드 박막은 CO/H<sub>2</sub>의 탄소원 유량비에 따라 마이크로파 화학기상 증착법으로 형성하였고, diamond/Si(100) 기판 위에 poly-Si는 LPCVD 법으로 증착하였다. 이렇게 제작된 시료에 대한 다이아몬드 박막의 결정성, 표면상태 그리고 전기적 특성과 SOD구조의 계면상태 등의 결과는 다음과 같다.

1) 형성된 다이아몬드 박막의 주 결정상은 CO/H<sub>2</sub> 유량비에 관계없이 (111) 면으로 나타났으며, CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18이 되도록 증착한 시료에서 (111) 면에 대한 선택적 배향, 결정립의 크기와 격자의 strain은 각각 74.1%, 36nm와 0.16%이었고, 비정질 carbon과 non-diamond 성분이 없는 양질의 다이아몬드 박막이 형성되었다.

2) CO/H<sub>2</sub> 탄소원의 유량비 증가에 따라 다이아몬드의 결정은 octahedron구조에서 cubo-octahedron 구조로 바뀌었으며, 결정면은 {111}과 {100}으로 혼합되어 형성되었다. 또한 diamond/Si(100) 계면은 void가 없는 평활한 계면을 이루었으며, 표면의 거칠기는 CO/H<sub>2</sub>의 유량비가 0.18이 되도록 증착한 시료에서 1.86 nm의 최소값을 가졌으나 그 이상의 유량비에서는 증가하였다.

3) poly-Si/diamond/Si(100) 구조형성에 있어서 poly-Si/diamond 계면은 다이아몬드 박막표면의 morphology에 의하여 평활하지 않았으며, 다이아몬드 결정과 결정들 사이에 함몰된 부분에는 poly-Si로 채워져 void는 나타나지 않았다.

4) 다이아몬드 박막의 유전상수, 누설전류와 비저항은 CO/H<sub>2</sub> 탄소원 유량비에 관계없이 각각 5.3,  $1 \times 10^{-9} \text{A/cm}^2$  그리고  $9 \times 10^7 \Omega\text{cm}$ 로 동일하였고, 인가전압을 100 V까지 인가하여도 breakdown 현상은 일어나지 않았다. 그러나 비저항값은 측정온도가 증가함에 따라 감소하여 500°C에서  $7.2 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ 의 값을 가진다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 1996년도 교육부 반도체분야 학술연구조성비(과제번호 : ISRC 96-E-1103)의 지원을 받아 수행되었기에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- G. Davies, *The Properties of Diamond* (Academic Press, London, 1979), Chap. 5.
- H. Shiomi, Y. Nishibayashi, and N. Fujimori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, L2153 (1989).
- K. Shenai, R.S. Scott, and B.J. Baliga, *IEEE Trans. Electron Devices*, **36**, 1811 (1989).
- M.I. Land strass and D.M. Fleetwood, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 2316 (1990).
- B.V. Spitsyn, L.L. Bouilov and B.V. Derjaguin, *J. Cryst. Growth*, **52**, 219 (1981).
- J.C. Angus and C.C. Hayman, *Science*, **241**, 913 (1998).
- K. Kobashi, K. Nishimura, Y. Kawata, and T. Horiuchi, *Phys. Rev.*, **B38**, 4067 (1988).
- R. Messier, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A4**, 490 (1986).
- B.R. Stoner and J.T. Glass, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 698 (1992).
- X. Jiang and C.P. Klages, *Diamond & Relat. Mater.*, **2**, 1112 (1993).
- P.O. Joffreau, R. Haubner, and B. Lux, *Mater. Res. Soc.*, **EA-15**, 15 (1988).
- T. Srivinyunon, R. Philips, C. Cutshaw, A. J. Joseph, and Y. Tzeng, *Proc. of the 2nd International Conference on New Diamond Science and Technology*, Material Research Society, 581 (1991).
- G-H. M. Ma, Y. Hirose, S. Amanuma, M. McClure, J.T. Prater, and J.T. Glass, *Proc. of the 2nd International Conference on New Diamond Science and Technology*, Material Research Society, 587 (1991).
- S. Koizumi, T. Murakami, T. Inuzuka, and K. Suzuki, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 563 (1990).
- W.A. Yarbrough, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A9**, 1145 (1991).
- N. Fujimori, T. Imai, H. Nakahata, H. Shiomi, and Y. Nishibayashi, *Mater. Res. Soc. Proc.*, **162**, 23 (1990).
- T. Tsuno, T. Imai, Y. Nishibayashi, K. Hamada, and

- N. Fujimori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, 1063 (1991).
17. H.G. Maguire, H. Kamo, H.P. Lang, E. Meyer, K. Weissendanger, and H.J. Guntherodt, *Diamond & Relat. Mater.*, **1**, 634 (1992).
18. L.F. Sutcu, M.S. Thompson, C.J. Chu, R.H. Hauge, J.L. Margave, and M.P. D'Evelyn, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 1685 (1992).
19. M. Frenklach and H. Wang, *Phys. Rev.*, **B43**, 1520 (1991).
20. P.K. Backmann, D. Leers, and H. Lydtin, *Diamond & Relat. Mater.*, **1**, 1 (1992).
21. N. Fujimori, T. Imai, and A. Doi, *Vacuum*, **6**, 99 (1986).
22. C. Wang, A. Hatta, J.H. Won, N. Jiang, T. Ito, T. Sasaki, and A. Hiraki, *Proc. of the 1st International Diamond Symposium*, 37 (1996).
23. M. Kamo, *New Diamond Forum*, **5**, 50 (1989).
24. K.V. Ravi, C.A. Koch, H.S. Hu, and A. Joshi, *J. Mater. Res.*, **5**, 2356 (1990).
25. Z. Jin, C. Gu, Q. Meng, X. Lu, G. Zou, J. Lu, D. Yao, X. Su, and Z. Xu, *Proc. of the 1st International Diamond Symposium*, 75 (1996).
26. A. Jauhiainen, S. Bengtsson, O. Engstrom, D.J. Pickrell, and D.S. Hoover, *Proc. of the 3rd International Symposium of 183rd Meeting of the Electrochem. Soc.*, 93-17, 927 (1993).