

ECR 산소 플라즈마에 의한 SiO₂ 박막의 성장 거동 및 전기적 특성

안성덕 · 이원종

한국과학기술원 전자재료공학과

(1994년 10월 14일 접수)

Growth and Electrical Characteristics of Ultrathin SiO₂ Film Formed in an Electron Cyclotron Resonance Oxygen Plasma

Seong-Deok Ahn and Won-Jong Lee

Dept. of Electronic Mater. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received October 14, 1994)

요 약

저압의 electron cyclotron resonance(ECR) 산소 플라즈마 분위기에서 기판 온도를 25°C 에서 205°C 로 변화시키면서 단결정 실리콘 기판 위에 실리콘 산화막(SiO₂)을 형성시켰다. 실리콘 산화막 형성 속도는 기판 온도가 증가함에 따라 증가하고, 압력이 증가함에 따라 감소하였다. 또한 기판에 양의 전압을 가하는 경우 그 형성속도는 변화가 없었으나, 음의 전압을 가하는 경우에는 증가하였다. ECR 산소 플라즈마에서 실리콘 산화막은 포물선 성장 거동식을 따라 성장하였다. Al/SiO₂/p-Si의 MOS capacitors를 형성하여 J-E, C-V 특성을 조사하였다. 10.2 nm 두께의 플라즈마 산화막의 경우, 1 MV/cm에서 누설 전류 밀도는 1.0×10^{-8} MV/cm² 이하였고 절연파괴전장은 10 MV/cm 이상이었다. Al/SiO₂/p-Si의 MOS capacitor의 평탄대역전압은 -2~-3 V 사이의 값을 가지며 유전 상수는 3.85였다. ECR 산소 플라즈마를 이용하면 열산화막과 유사한 물성을 가지는 양질의 산화막을 저온에서 빠른 속도로 형성시킬 수 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Silicon oxide films were grown on single-crystal silicon substrates at low temperatures (25~205°C) in a low pressure electron cyclotron resonance (ECR) oxygen plasma. The growth rate of the silicon oxide film increased as the temperature increased or the pressure decreased. Also, the thickness of the silicon oxide film increased at negative bias voltage, but not changed at positive bias voltage. The growth law of the silicon oxide film was approximated to the parabolic form. Capacitance-voltage (C-V) and current density-electric field (J-E) characteristics were studied using Al/SiO₂/p-Si MOS structures. For a 10.2 nm thick silicon oxide film, the leakage current density at the electric field of 1 MVcm⁻¹ was less than 1.0×10^{-8} Acm⁻² and the breakdown field was higher than 10 MVcm⁻¹. The flat band voltage of Al/SiO₂/p-Si MOS capacitor was varied in the range of -2~-3 V and the effective dielectric constant was 3.85. These results indicate that high quality oxide films with properties that are similar to those of thermal oxide film can be fastly grown at low temperature using the ECR oxygen plasma.

Key words: ECR oxygen plasma, SiO₂, Parabolic growth

1. 서 론

최근 active matrix LCD 방식의 기본 소자로 poly-Si TFT를 채택하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. Poly-Si TFT는 비정질-Si TFT보다 전하 캐리어(charge carrier) 이동도가 크고 신뢰성이 좋으며 주변 구동 회로도

동일 기판에 집적화시킬 수 있다는 장점이 있다. 그런데 이러한 주변 회로까지 집적화시킨 대면적의 poly-Si TFT를 실현시키기 위해서는 기판으로서 고가의 석영 유리 대신 가격적으로 경쟁력 있는 저가의 붕규산 유리를 사용하여야 한다. 이를 위해서는 모든 공정이 최소한 유리 기판의 연화점인 600°C 이하에서 이루어져야 하며,

가능한 한 보다 낮은 공정 온도가 요구되고 있다. 집적 회로(IC) 소자의 경우에도 집적도가 심화됨에 따라 저온 공정의 필요성이 점차 증가되고 있다. 고온 공정은 thermal budget을 발생시켜서 결합 형성, 불순물의 확산 및 재분포, 접합(junction)의 이동, 물질간의 반응, 열에 의한 응력 형성 등의 문제를 일으킨다¹⁻⁴.

실리콘 산화막은 poly-Si TFT의 gate 산화막을 비롯하여 반도체 소자에서 가장 널리 쓰이고 있는 절연/유전 재료이다. 이 실리콘 산화막을 저온에서 형성시키기 위하여 플라즈마를 이용하는 연구⁵⁻¹⁹는 지난 십여년간 관심 있는 주제였으나 여전히 관련 반응 과정이나 속도식은 완전히 이해되고 있지 못하고 있다.

본 연구에서는 기존의 RF 플라즈마보다 가스의 이온화율 및 분해 효율이 수백배 이상 높고 이온 충돌에 의한 기판 손상이 적은 electron cyclotron resonance(ECR) 플라즈마를 이용하여 저온에서 양질의 실리콘 산화막을 형성시키고, 산화막의 형성 기구 및 전기적 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

플라즈마 산화 실험에 쓰인 ECR 플라즈마 장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 챔버는 플라즈마를 발생시키는 ECR 플라즈마 발생 챔버와 반응이 일어나는 반응 챔버로 이루어져 있다. 플라즈마 발생 챔버는 bell jar 형태의 직경 15 cm인 석영 유리로 만들어져 있는데, 챔버 주위의 자기 발생용 코일에서 전자공진 발생을 위한 자기장을 형성시킨다. 직류 마그네트론은 직각 도파관(rectangular waveguide)과 석영 유리창을 통해 산소 분위기의 플라즈마 발생 챔버에 2.45 GHz의 진자파(microwave)를 공급하여 ECR 산소 플라즈마를 형성시킨다. 형성된 ECR 산소 플라즈마는 발산 자기장을 따라 반응

챔버로 내려와 기판 지지대 위에 놓여 있는 실리콘 기판을 산화시킨다.

실험에 사용된 기판은 5~10 Ω·cm의 비정량 값을 갖는 B가 도핑된 p형 Si(100)이다. 시편은 RCA 세정방법으로 Si 기판 표면에 존재하는 오염 물질과 자연 산화막을 제거한 다음 로드락(loadlock)을 통해서 반응 챔버로 이동된다. 증착 챔버는 확산 펌프와 직렬식 로타리 펌프를 이용하여 2×10⁻⁶ Torr의 압력까지 기본 진공도를 유지하다가 산화 반응을 위하여 원하는 압력을 갖도록 산소(99.999%)를 흘려주면서 ECR 산소 플라즈마를 발생시켰다. 압력은 이온 게이지(ion gauge)와 conventron 게이지를 이용하여 측정하였다.

ECR 플라즈마 분위기에서 산화 온도, 압력과 같은 산화 조건을 변화시키면서 실리콘 산화막의 형성 거동을 조사하였다. 실험 조건은 Table 1에 정리하였다. 증착된 박막의 두께와 굴절률을 측정하기 위하여 ellipsometer (Rudolph Research/Auto EL)를 사용하였는데 이때 사용한 레이저(laser) 빔은 He-Ne 레이저로 파장은 632.8 nm이었다. ECR 산소 플라즈마 내에서의 산소 기체의 분해 형태와 농도 변화를 고찰하기 위해 OES(optical emission spectroscopy)를 이용하였는데 이때 파장의 분해능은 0.1 nm이며 측정 파장 범위는 200~800 nm이었다. 박막의 성분은 AES(Auger electron spectroscopy)로 분석하였는데 입사전자빔의 전압은 5 keV, modulation 전압은 4 V이었다. 표면 오염층은 제거하기 위하여

Table 1. Experimental Conditions for ECR Plasma Oxidation.

Substrate	p-type Si (100)
Environment	ECR 100% oxygen plasma
Oxidation temperature (°C)	25~205
Pressure (mTorr)	0.18, 1.3
O ₂ flow rate (sccm)	10
Microwave power (W)	300
Distance between ECR layer and substrate (cm)	15

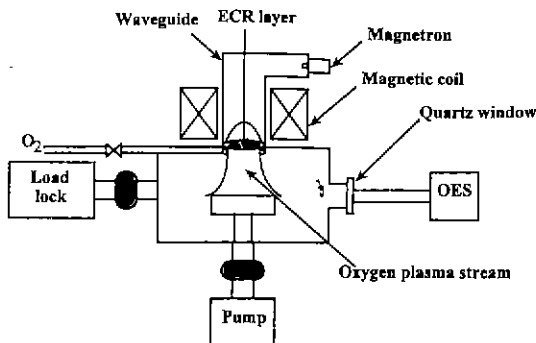


Fig. 1. Schematic diagram of ECR oxidation system.

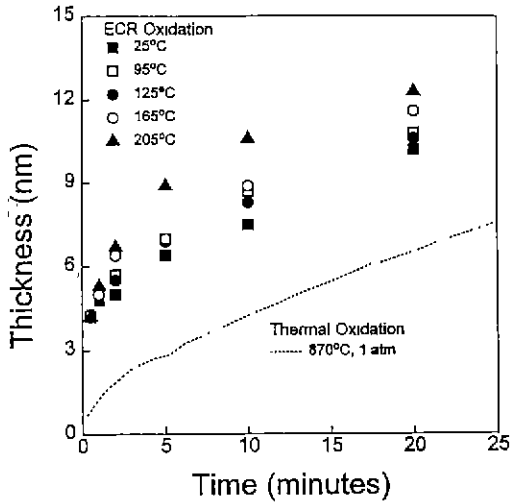


Fig. 2. Growth of silicon oxide in an ECR oxygen plasma at 0.18 mTorr for various oxidation temperatures between 25°C and 205°C. For comparison, the thermal growth of silicon oxide in an oxygen environment at 870°C and 1 atm is represented as a broken line¹⁶⁾.

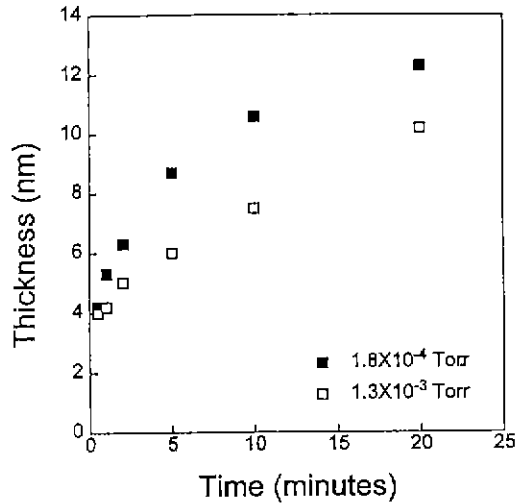


Fig. 3. Growth of silicon oxide in an ECR oxygen plasma at different pressures. Microwave powder 300 W and oxidation temperature 205°C.

Ar으로 표면을 스퍼터링(sputtering) 한 후, 분석넓이 10 μm×15 μm의 면적 방식으로 분석하였다. 이때 이온 빔의 전압과 전류 밀도는 각각 5 keV, 58.5 μA/cm²이었으며, 스퍼터링 속도는 분당 7 nm이었다.

산화막의 전기적 특성을 관찰하기 위해서 Al/SiO₂/p-Si의 MOS 구조를 형성하였다. Si 기판 위에 ECR 플라즈마를 이용하여 실리콘 산화막을 형성시킨 후 열진공증착법으로 증착된 Al 박막을 사진 식각 공정을 이용하여 지름 0.5 mm 크기의 Al 전극을 만들었다. Si 기판 뒷면을 Al로 전면(blanket) 증착하고, 진공 척(chuck)을 이용하여 뒷면 전극의 접촉을 향상시켰다. 유전용량(C)-전압(V) 측정을 위해 HP 4275A multi-frequency LCR meter를 이용하였다. 누설 전류 특성을 평가하기 위하여 전류밀도(I)-전장(E)을 HP 4145B pA meter를 이용하여 측정하였다. 이때 p형 Si에 전하추적영역이 형성되도록 Al 전극의 음의 전압을 인가하였으며, step delay time은 2초였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실리콘 산화막의 성장 거동 및 물성 변화

ECR 산소 플라즈마에 의한 실리콘 산화막의 성장 기구를 고찰하기 위해서 동일한 플라즈마 산화 조건하

에서 산화 온도 변화에 따른 실리콘 산화막의 성장 거동을 Fig 2에 나타내었다. 산화 온도는 25~205°C 까지 변화시켰으며, 전자파 출력 300 W 압력 0.18 mTorr에서 ECR 산화 실험을 행하였다. 참고로 건식 열산화법으로 870°C, 1기압하에서 (100) 실리콘 기판 위에 형성시킨 실리콘 산화막의 성장 거동을 점선으로 표시하였다¹⁶⁾. 상온(25°C)에서의 ECR 산소 플라즈마에 의한 산화막 성장속도가 870°C에서의 건식 열산화법에 의한 성장속도보다 더 빠른 것으로 보아 ECR 산소 플라즈마가 산화 속도를 매우 크게 증가시킴을 알 수 있다.

압력 변화에 따른 실리콘 산화막의 성장 거동을 Fig 3에 나타내었다. 시편은 산화 온도 205°C, 전자파 출력 300 W에서 ECR 산소 플라즈마를 이용하여 산화시켰다. 낮은 압력(1.8×10⁻⁴ Torr)에서 실리콘 산화막의 성장속도가 높은 압력(1.3×10⁻³ Torr)보다 더 큼을 알 수 있다. ECR 플라즈마는 압력이 낮을수록 전자의 에너지가 높아져서 가스의 이온화 효율이 높아지며 따라서 가스의 분해율도 높아진다. 따라서 낮은 압력에서 실리콘 산화막의 성장속도가 더 큰 것은 비록 산소의 농도는 작지만 반응성 및 확산속도가 큰 산소 이온 및 radical의 농도가 높은 압력의 경우보다 더 크기 때문으로 생각할 수 있다.

ECR 산소 플라즈마를 이용하여 성장시킨 실리콘 산화막의 굴절률은 1.44~1.66으로서 열산화 실리콘 산화막의 경우와 거의 같은 값을 나타내었다. ECR 산소 플

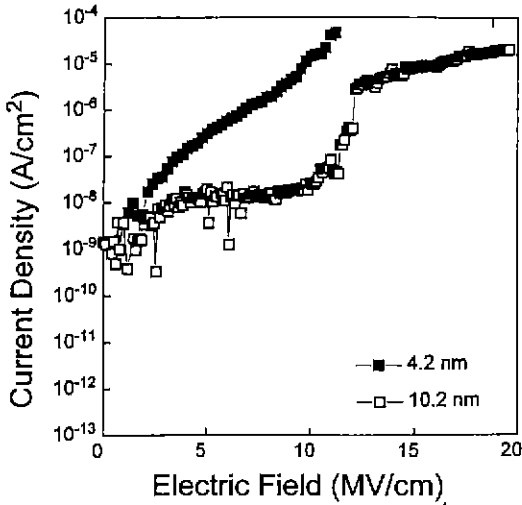


Fig. 4. J-E curves for SiO₂ films formed in an ECR oxygen plasma at 205°C and 300 W.

라즈마를 이용하여 증착한 실리콘 산화막의 성분 분석을 위해서 AES 분석을 행하였다. 205°C 에서 성장시킨 ECR 플라즈마 실리콘 산화막과 900°C 에서 건식 열산화법으로 형성시킨 실리콘 산화막의 AES 스펙트럼을 비교해 본 결과, ECR 플라즈마 산화에 의해 형성된 실리콘 산화막의 조성은 열 산화막과 같이 실리콘과 산소의 비가 1 : 2이며, 실리콘과 산소의 AES 피크(peak) 형태도 차이가 없음을 알 수 있었다. 굴절률 측정과 AES 분석을 통해 ECR 플라즈마를 이용하여 증착된 실리콘 산화막은 열산화막과 동일한 물성과 조성을 가지고 있다고 판단 되었다.

205°C 에서 ECR 플라즈마 분위기에서 성장시킨 4.2 nm와 10.2 nm 두께의 산화막의 누설 전류 특성을 Fig. 4 에 나타내었다. 절연과피전장을 $J=10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 일 때의 전장으로 잡았을 때 두께 4.2 nm의 산화막은 약 6 MV/cm 그리고 두께 10.2 nm의 경우에는 약 10 MV/cm의 절연과피전장을 보여주었다. 이것은 열산화 실리콘 산화막의 누설전류 특성과 대등한 우수한 특성이다.

Gate bias 변화에 따른 ECR 플라즈마 실리콘 산화막의 정전 용량을 Fig. 5에 나타내었다. ECR 플라즈마 실리콘 산화막은 -2~-3V의 음의 평탄대역전압(V_{FB})을 나타내고 있다. 박막내에 전자가 존재하지 않을 때 Al/SiO₂/p-Si의 V_{FB} 는 -0.9~-1.0 V 정도이므로 플라즈마 실리콘 산화막 내에 양의 전하들이 포획되어 있음을 알 수 있다. 그리고 4.2 nm 두께의 실리콘 산화막은 심한 이력 현상을 보이지만 10.2 nm 두께의 산화막은 거의 이력 현상을 보이지 않는다. 정전 용량을 이용하여 플라즈마 실리콘

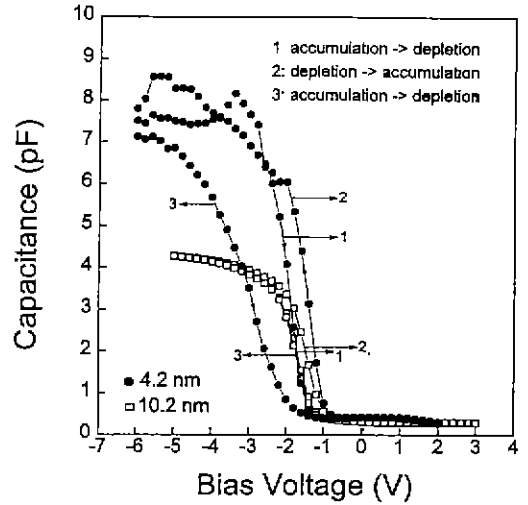


Fig. 5. High frequency C-V plots for an Al/SiO₂/p-Si capacitor with the silicon oxide films formed in an ECR oxygen plasma at 205°C.

산화막의 유전 상수 값을 계산하였다. 4.2 nm 두께의 박막의 경우 유전 상수가 2.9 정도로 작게 나타난 것으로 보아 박막이 너무 얇아서 제대로 유전 박막의 역할을 하지 못함을 알 수 있다. 이것은 실리콘과 실리콘 산화막 계면에 형성되는 결함에 기인한다고 판단된다. 반면에 10.2 nm 두께의 플라즈마 실리콘 산화막은 그 유전상수가 3.85로 열산화막과 같은 값을 나타내었다. 그러므로 ECR 산소 플라즈마를 이용하여 우수한 전기적 특성을 갖는 실리콘 산화막을 저온에서도 빠른 속도로 형성시킬 수 있음을 알 수 있었다.

3.2. 실리콘 산화막의 성장 기구 고찰

Fig. 2에서 보면 초기 30초 동안 성장한 산화막의 두께는 기판 온도 변화에 무관하게 4.2 nm이었다. 이는 실리콘 기판이 ECR 산소 플라즈마에 노출되었을 때 약 4 nm 정도의 실리콘 산화막이 기판 온도와 무관하게 매우 빠른 속도로 성장하였음을 의미한다. 그 이후에는 실리콘 산화막 두께가 증가함에 따라 산화막의 성장 속도는 감소하였다. 실리콘 산화막의 증착 두께에 대한 시간 의존성을 분석한 결과 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있었다.

$$L^2 = A + B \cdot t \tag{1}$$

이 때 L은 실리콘 산화막의 두께, t는 산화 시간, A, B는 상수(특히, B는 포물선(parabolic) 상수임)이다. Fig. 6에 여러 온도에서 형성시킨 실리콘 산화막의 성장 두께를

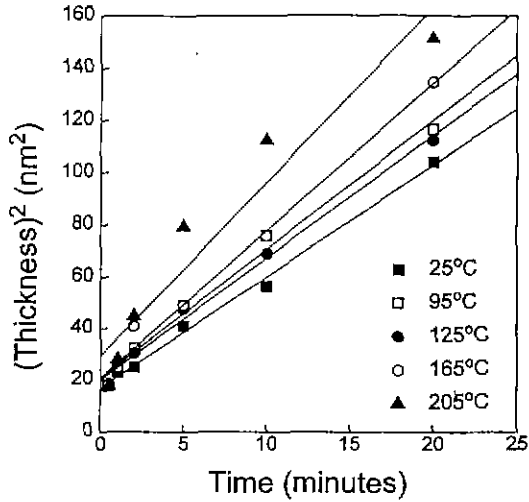


Fig. 6. Square of oxide thickness vs the ECR oxidation time for various oxidation temperatures. The solid lines represent least square fit lines.

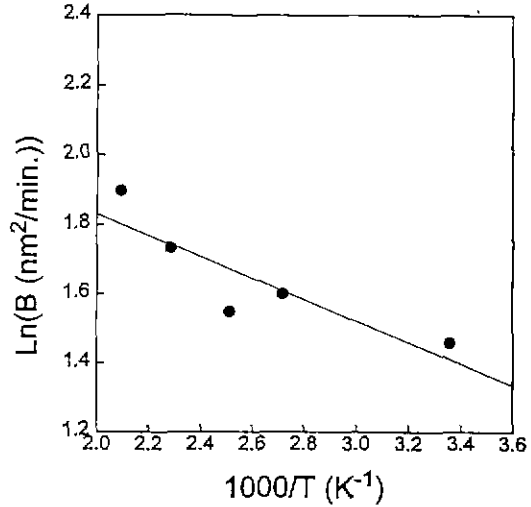


Fig. 7. Arrhenius plot of parabolic coefficients obtained from the least square fit lines in Fig. 6. The solid line represents a least square fit of the experimental data.

식 (1)에 따라 최소 이승법(least square fit)으로 나타내었다. 205°C 경우를 제외하고는 ECR 플라즈마 실리콘 산화막은 대체로 포물선 성장 거동식을 따라 성장함을 알 수 있다. 이것은 실리콘 산화막의 성장속도 제한 단계가 Si 기판과의 반응이 아닌 산화종의 확산임을 의미한다.

포물선 상수 B는 확산 계수 D와 서로 비례하는 관계를 가지므로 포물선 상수의 온도 의존성을 알면 실리콘 산화막의 형성에 대한 활성화 에너지를 구할 수 있다. 확산 계수는 온도(T)와 활성화 에너지(E_a)에 의존하며 다음과 같은 관계를 가진다.

$$B \propto D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

이 때 k는 Boltzmann 상수이며, D₀는 확산상수이다. Fig. 6의 최소 이승법으로부터 구한 포물선 상수(B)를 온도의 함수로 Arrhenius plot을 하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 최소 이승법의 기울기로부터 확산에 필요한 활성화 에너지(E_a)가 0.027 eV라는 결과를 얻을 수가 있었다. 열산화에서 실리콘 산화막 형성의 경우에는 활성화 에너지가 2.1 eV로 보고되고 있는데 이 값은 용융 석영을 통한 O₂의 확산에 대한 활성화 에너지와 거의 같은 값이기 때문에, 열산화의 경우에는 확산종이 O₂라고 생각되고 있다¹⁷⁾. 이 활성화 에너지 값을 비교해 볼 때, ECR 플라즈마 산화가 열산화의 경우에 비해 확산종이 더 빠른 속도로 산화막의 내부로 확산함을 알 수 있다.

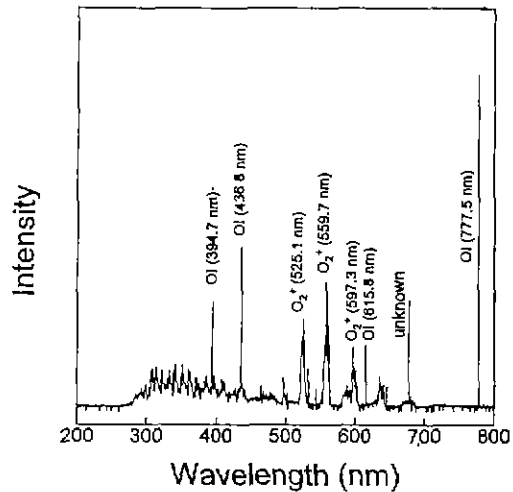


Fig. 8. Typical optical emission spectrum obtain from the ECR oxygen plasma at 300 W microwave power, showing emission peaks from oxygen atoms (OI) and molecular oxygen ions (O₂⁺).

이는 산소 플라즈마에 의한 산화 기구는 열산화에 의한 산화 기구와 다르다는 것을 의미하며 즉, 열산화에서 제시된 O₂가 확산종이 아니고 O₂에 비해 크기가 작은 다른 확산종이 플라즈마 산화에는 관계함을 나타낸다. 전자파 출력 300 W에서 얻은 ECR 산소 플라즈마에 대한 OES 스펙트럼을 Fig. 8에 나타내었다. 394.7, 436.8,

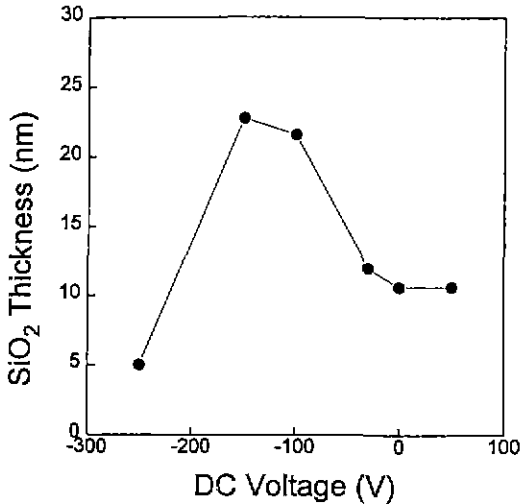


Fig. 9. Thickness of the silicon oxide film formed in the ECR oxygen plasma for various substrate biases. The plasma oxidation was carried out at 25°C, 300 W and 0.18 mTorr for 30 minutes.

615.8, 775.5 nm에서 산소 원자(O)로부터 나온 매우 뾰족한 발산 피크(emission peak)들과 525.1, 559.7, 597.3 nm에서 산소 분자 이온(O₂⁺)으로부터 나온 비교적 폭이 넓은 피크들이 관찰되고 있다. 이들 피크들은 O와 O₂⁺ 같은 화학종들이 ECR 산소 플라즈마 내에 많이 존재함을 나타낸다. OES 스펙트럼에서는 잘 나타나지 않으나 O⁻ 이온도 산소 플라즈마에서 존재 가능하다고 보고하고 있다^{10,11,15}). 일반적으로 저온 플라즈마에서는 radical의 수가 이온들의 수에 비해 상당히 크므로 ECR 산소 플라즈마의 경우에도 산소 원자의 농도가 산소 이온의 농도에 비해 매우 크다고 예상된다. 이것은 Fig. 8에서 ECR 산소 플라즈마에 대한 OES 스펙트럼을 살펴보면 산소 원자의 발산 피크가 산소 이온의 발산 피크에 비해 매우 큼을 알 수 있다. 그러므로 기판에 전기장을 가하지 않은 경우에는 산소 원자(O)가 실리콘 산화막을 형성하는 주요한 산화종이라고 판단된다.

기판에 전기장을 가하는 경우 ECR 산소 플라즈마에서 O₂⁺, O⁻ 같은 산소 이온들이 주요한 산화종으로 작용할 것으로 판단되며, 이 경우 실리콘 산화막에 걸리는 전기장에 따라 확산속도의 확산속도 및 실리콘 산화막의 성장속도가 달라질 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위해서 기판에 양과 음의 전압을 가함에 따른 실리콘 산화막의 성장속도 변화를 조사하였다. Fig. 9는 상온에서 300 W, 0.18 mTorr의 조건에서 ECR 산소 플라즈마에서 30분간 형성시킨 실리콘 산화막의 기판 전압에 따른 두께

변화를 나타내고 있다. 기판에 음의 전압을 가한 경우에는 전압이 증가함에 따라 실리콘 산화막의 두께는 증가하였다. 그러나 한편 이온 충돌에 의한 실리콘 산화막의 스피터링 효과도 커져서 -250 V에서는 실리콘 산화막의 두께가 오히려 감소하였다. 기판에 너무 큰 양의 전압을 가할 경우에는 ECR 산소 플라즈마 형성에 필요한 전자를 기판이 너무 많이 끌어들이어서 플라즈마가 꺼져 버리므로 어느 값 이상의 양의 전압을 가할 수 없었다. 기판에 +50 V의 전압을 가한 경우 실리콘 산화막의 두께의 변화는 관찰할 수 없었다. 그러므로 기판에 양의 전기장을 가한 경우에는(+50 V까지) O⁻ 이온들은 실리콘 산화막을 형성하는데 큰 역할을 하지 못하고, 기판에 음의 전기장을 가한 경우에는 O₂⁺ 이온들이 실리콘 산화막을 형성하는 주요한 산화종이라고 판단된다.

결론적으로 저온 ECR 플라즈마 산화에서 실리콘 산화막을 형성하는 산화종은 기판에 전기장을 가하지 않은 경우에는 산소 원자(O)가 주요한 산화종이라 판단되며, 이는 산소 분자에 비해 매우 작은 크기를 가져서 빠른 성장 속도와 낮은 활성화 에너지를 가진다. 전기장을 가한 경우에는 양의 산소 이온(O₂⁺)이 실리콘 산화막을 형성하는 주요한 산화종이라 판단되며, 이는 산화막에서 형성된 전기장에 의한 이온 확산에 의해 빠른 성장 속도를 갖는 것으로 판단된다.

4. 결 론

저압 ECR 산소 플라즈마를 이용하여 저온(25~205°C)에서 단결정 실리콘 기판 위에 실리콘 산화막을 형성시켰다. 실리콘 산화막은 초기 30 이내 온도와 무관하게 약 4 nm 두께로 성장하였으며, 이후에는 대체적으로 포물선 성장 거동을 나타내었으며 이 포물선 상수는 증착 온도가 증가함에 따라 증가하는 온도의 함수이다. 또한 압력이 감소함에 따라 실리콘 산화막의 성장 두께는 증가하였다. 실리콘 산화막을 형성하는 주요 산화종은 산소 원자(O)라 판단되고, 전기장을 가한 경우에는 양의 산소 이온(O₂⁺)으로 판단된다. ECR 산소 플라즈마 하에서 205°C에서 성장시킨 실리콘 산화막은 Si와 O의 화학양론비가 1 : 2로 잘 맞고, 열산화막과 동일한 우수한 물리적·전기적 특성을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 RETCAM(신소재 박막가공 및 결정성장

연구센터)를 통한 과학재단의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. U.S. Kim, T. Kook, and R.J. Jaccodine, "Diffusion of boron in silicon during O₂/NF₃ oxidation," *J. Electrochem. Soc.*, **135**(1), 270-271 (1988).
2. S.M. Hu, "Stress-related problems in silicon technology," *J. Appl. Phys.*, **70**(6), R53-R80 (1991).
3. B.E. Deal, A.S. Grove, E.H. Snow, and C.T. Sah, "Observation of impurity redistribution during thermal oxidation of silicon using the MOS structure," *J. Electrochem. Soc.*, **112**(3), 308-314 (1965).
4. S.P. Murarka, "Oxygen partial-pressure dependence of the oxidation-induced surface stacking faults in (100) n silicon," *J. Appl. Phys.*, **48**(12), 5020-5026 (1977).
5. E. Bassous, H.N. Yu, and V. Maniscalco, "Topology of silicon structures with recessed SiO₂," *J. Electrochem. Soc.*, **123**(11), 1729-1737 (1976).
6. A.K. Ray and A. Reisman, "The formation of SiO₂ in a RF generated oxygen plasma I. The pressure range below 10 mTorr," *J. Electrochem. Soc.*, **128**(11), 2460-2466 (1981); "The formation of SiO₂ in a RF generated oxygen plasma II. The pressure range above 10 mTorr," 2466-2472 (1981).
7. A. Kiermasz, W. Eccleston and J.L. Moruzzi, "Theory of the growth of SiO₂ in an oxygen plasma," *Solid State Electronics*, **26**(12), 1167-1172 (1983).
8. C. Vinckier, P. Coeckelberghs, G. Stevens, M. Heyns and S. De Jaegere, "Kinetics of silicon in the afterglow of microwave-induced plasma," *J. Appl. Phys.*, **62**(4), 1450-1458 (1987).
9. D.A. Carl, D.W. Hess and M.A. Liberman, "Oxidation of silicon in an electron cyclotron resonance oxygen plasma: Kinetics, physicochemical, and electrical properties," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**(3), 2924-2930 (1990).
10. D.A. Carl, D.W. Hess, M.A. Liberman, T.D. Nguyen and R. Gronsky, "Effects of dc bias on the kinetics and electrical properties of silicon dioxide in an electron cyclotron resonance plasma," *J. Appl. Phys.*, **70**(6), 3301-3313 (1991).
11. J. Joseph, Y.Z. Hu, and E.A. Irene, "A kinetics study of the electron cyclotron resonance plasma oxidation of silicon," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **10**(2), 611-617 (1992).
12. Y.Z. Hu, Y.Q. Wang, M. Li, J. Joseph and E.A. Irene, "In situ investigation of temperature and bias dependent effects on the oxide growth of Si and Ge in an electron cyclotron resonance," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **11**(4), 900-904 (1993).
13. K.T. Sung and S.W. Pang, "Oxidation of silicon in an oxygen plasma generated by a multipolar electron cyclotron resonance," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **10**(5), 2211-2216 (1992).
14. G.T. Salbert, D.K. Reinhard, and J. Asmussen, "Oxide growth on silicon using a electron cyclotron resonance oxygen plasma," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**(3), 2919-2923 (1990).
15. S. Kimura, E. Murakami, K. Miyake, T. Warabisako, H. Sunami, and T. Tokuyama, "Low temperature oxidation of silicon in a microwave discharged oxygen plasma," *J. Electrochem. Soc.*, **132**(6), 1460-1466 (1985).
16. J. Blanc, "The oxidation of silicon by dry oxygen can we distinguish between models," *Philosophical Magazine B*, **55**(6), 685-710 (1987).
17. S. Wolf and R.N. Tauber, Silicon Processing for the VLSI Era Volume 1-Processing Technology, 198-241, Lattice Press, Sunset Beach, California, (1986).