

저압급속열산화법과 플라즈마확산산화법에 의한 실리콘 산화박막의 제조

고천광 · 이원규[†]

강원대학교 화학공학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1
(2008년 1월 9일 접수, 2008년 2월 20일 채택)

Fabrication of Ultrathin Silicon Oxide Layer by Low Pressure Rapid Thermal Oxidation and Remote Plasma Oxidation

Cheon Kwang Ko and Won Gyu Lee[†]

Department of Chemical Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja 2-dong, Chuncheon, Kangwon 200-701, Korea
(Received 9 January 2008; accepted 20 February 2008)

요 약

본 연구에서는 5nm 이하의 실리콘 산화박막 성장을 위하여 저압급속열산화법과 플라즈마확산산화법을 사용하여, 실리콘 산화박막의 성장특성을 분석하였다. 저압급속열산화법으로 기판의 온도와 산소기체의 유량 변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장은 공정시간 5분이 경과 할 때 까지 급격한 증가를 보이다 성장 속도가 포화되는 특성을 나타내었다. 또한 900 °C에서 5 nm의 최대 두께를 가진 산화박막을 얻을 수 있었다. 플라즈마확산산화법은 기판의 온도와 압력은 500 °C, 200 mTorr으로 고정했을 때, 플라즈마 세기와 산소기체의 유량이 증가할수록 산화박막의 성장속도는 증가하였다. 보통 4분이 경과한 후 성장속도가 포화영역에 도달하여 산화막의 두께가 거의 일정하게 되는 것을 알 수 있었다. 저압급속열산화법에 의해 성장된 산화박막은 일반열산화법에 의해 제조된 산화박막의 특성과 거의 같았다.

Abstract – In this work, the use of LPRTO (low pressure rapid thermal oxidation) and remote plasma oxidation was evaluated for the preparation of ultra thin silicon oxide layer with less than 5 nm. The silicon oxide thickness grown by LPRTO was rapidly increased and saturated. The maximum thickness could be controlled at about 5 nm. As RF power and oxygen flow rate at a remote plasma oxidation increased, the behavior of oxide growth was almost the same as that of LPRTO. The oxide thickness of 4 nm was the maximum obtained by a remote plasma oxidation in this work. The quality of silicon oxide grown by LPRTO was comparable to the thermally grown conventional oxide.

Key words: Silicon Oxide, Rapid Thermal Oxidation, Remote Plasma Oxidation

1. 서 론

실리콘 산화박막은 실리콘 집적회로뿐만 아니라 TFT-LCD(thin film transistor liquid crystal display)에서 절연막과 확산보호막 등에 주로 사용되고 있다. 실리콘 산화박막을 형성하기 위한 산화공정으로 열산화(thermal oxidation)법이 많이 사용되고 있으나 소자를 제조하는 연속공정 중 중간과정에 상대적으로 고온인 열산화법으로 산화박막을 형성함으로써 발생할 수 있는 도핑물질의 재확산, 기판의 변형 등의 문제점이 발생할 수 있다. 또한 산화박막의 특성은 막 내부에 불순물, 결함의 형성, 균일한 계면 등 물리화학적 특성에 의해 결정되므로 이러한 특성을 개선하기 위한 다양한 공정들이 제시되고 있다[1-3].

SiO₂(silicon dioxide) 박막은 높은 열전도성, 매우 좋은 절연특성,

매우 낮은 수분 흡수율, 기체 또는 이온 불순물의 낮은 침투성, 이온들의 낮은 확산속도, 작은 누설 전류 등의 장점 때문에 광학, 전자공학, 마찰공학 등 많은 분야에서 응용되고 있다. SiO₂ 박막을 성장시키는 일반적인 방법은 산소 분위기 하의 900~1,200 °C에서 Si 기판 위에 SiO₂ 박막을 성장시키는 열산화법이다. 그러나 이런 높은 온도에서의 성장은 접합 저하(junction degradation)를 유발한다[4]. 이러한 단점을 보완하기 위해서 SiO₂ evaporation[5], PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)[6], reactive sputtering[7], plasma oxidation[8], UV oxidation[9] 등 비교적 낮은 공정온도에서 실리콘 산화막을 성장 또는 형성시키려는 노력들이 지속적으로 이루어져 왔다. 또한 반도체 소자의 적용에서 소자의 집적도가 급속도로 증가함에 따라 MOS 트랜지스터의 게이트 박막으로서의 실리콘산화박막의 초 박막화가 요구되고 있으며 한편으로는 고온공정에 따른 소자의 안정성을 저해하는 요소를 제거하기 위하여 저온공정을 요구하는 추세이다[10].

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: wglee@kangwon.ac.kr

본 연구에서는 저압급속열처리(LPRTO: low pressure rapid thermal oxidation)를 이용하여 산소가스의 유량과 기판의 온도변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장특성과, 플라즈마확산산화법을 이용하여 플라즈마 출력과 산소유량의 변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장특성을 분석하였다. Ellipsometer를 이용하여 성장된 산화박막의 두께와 굴절률을 측정하였으며, FT-IR을 이용하여 산화박막의 구조를 확인하였다. ESCA 분석을 통해 성장된 실리콘 산화박막의 조성비를 분석하였다.

2. 실험

저압급속열산화법과 플라즈마확산산화법을 이용하여 실리콘 산화박막을 형성하기 위해 2 cm×2 cm인 Si(100) 실리콘 단결정 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. H₂SO₄:H₂O₂:H₂O의 비가 1:1:2로 희석시킨 혼합액에 30분간 실리콘 웨이퍼를 담궈 표면에 원자나 분자 상태로 존재하는 증속과 유기물인 불순물을 제거한 후 탈이온수로 세척하였다. 표면에 존재하는 자연산화막을 제거하기 위해 HF:H₂O의 비를 1:50으로 희석된 HF 용액으로 처리하였으며, 탈이온수를 이용하여 세척한 후 N₂ 가스를 불어 건조시켰다.

본 실험에서는 Fig. 1의 실험 장치를 이용하여 반응기 내의 압력을 200 mTorr로 유지시켜 산소기체의 유량 변화와 기판의 온도 변화를 통해 저압급속열산화법으로 실리콘 산화박막을 제조하였다. 목표온도까지의 승온속도는 25 °C/sec로 유지시켰다. 또한 같은 반응 장치를 이용한 플라즈마확산산화법에서는 반응실 내의 압력을 200 mTorr, 기판의 온도를 500 °C로 유지시켜 플라즈마 세기 변화와 산소가스의 유량변화를 통해 실리콘 산화박막을 제조하였다. 저압급속열산화법과 플라즈마확산산화법에 의한 산화박막 성장 실험 조건을 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

제조된 산화박막의 물리/화학적 특성 분석은 다음과 같은 장비를 사용하였다. 실리콘 산화박막을 성장시킨 후 형성된 산화박막의 두께와 굴절률을 측정하기 위하여 spectroscopic ellipsometer(Nano View, SE MG1000-V)로 분석하였다. 성장된 산화박막의 결합 구조는 FT-IR(ABB, FTLA 2000)에 의해 흡광도의 변화로 확인하였다. 저압급속열산화와 플라즈마확산법에 의해 형성된 산화박막의 조성비를 ESCA(electron spectroscopy for chemical analysis)를 이용하여 분석하였다. ESCA는 Thermo VG사의 SIGMA PROBE (Monochromatic AlK α , 15 kV, 70 W, 2×10⁻⁹torr)를 사용하였고, C(1s) 284.5 eV를 기준피크로 하여 측정하였다.

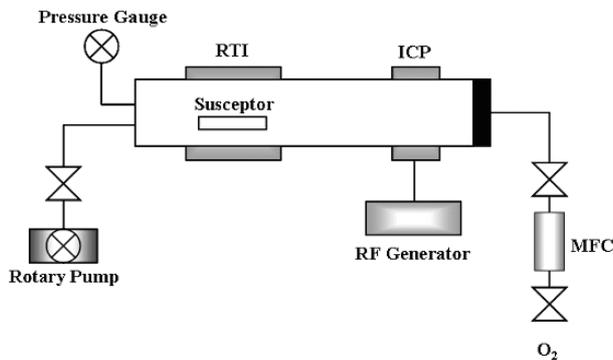


Fig. 1. Schematic diagram of low pressure rapid thermal oxidation and remote plasma oxidation apparatus (RTI: rapid thermal instrument).

Table 1. Process parameters of low pressure rapid thermal oxidation (LPRTO)

Experimental condition	
Substrate temperature	500~900 °C
Pressure	200 mTorr
O ₂ flow rate	20~40 sccm
Lamp-up	25 °C/sec
Oxidation time	1~30 min

Table 2. Process parameters of remote plasma oxidation method

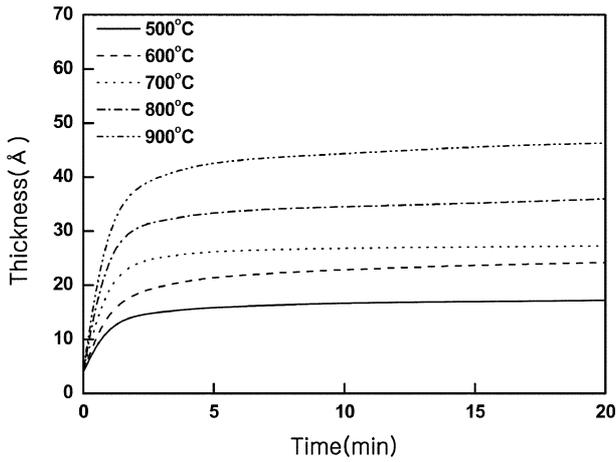
Experimental condition	
Substrate temperature	500 °C
Pressure	200 mTorr
O ₂ flow rate	20~40 sccm
RF power	0~200 W
Oxidation time	1~30 min

3. 결과 및 고찰

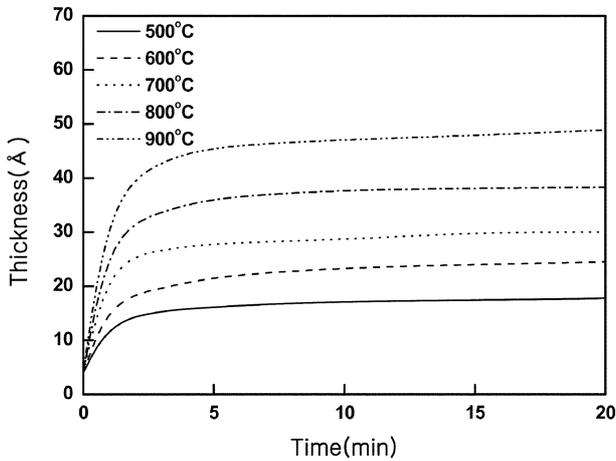
3-1. 저압급속열산화법에 의한 실리콘 산화박막

저압급속열산화법을 이용하여 기판의 온도와 산소가스 유량 변화에 따른 실리콘 산화박막 성장특성에 대해 알아보았다. 급속열산화를 위한 할로겐램프의 승온속도는 25 °C/sec로 고정하여 각각 500~900 °C의 목표온도까지 승온시켜 실리콘 산화박막을 성장시켰다. Fig. 2는 산소가스의 유량 변화에 따른 각각의 목표온도에서 성장된 산화박막의 두께를 보여주고 있다. 산화온도가 증가할수록 급속열산화에 의해 성장되는 산화박막의 두께는 증가하고 있다. Fig. 2(c)에서 반응기체인 산소가스의 유량이 40 sccm일 때 5분 후 성장된 산화박막의 두께는 4.6 nm였으며, 이후 20분까지 산화반응 후 성장된 산화박막의 두께가 5.1 nm로 나타나고 있다. 실리콘의 산화반응 시간이 5분 이후부터 실리콘 산화박막의 성장이 둔화되기 시작하였다. Fig. 3은 처음 5분까지의 산화 시간 동안 성장된 산화박막의 성장속도를 나타내고 있다. 700 °C 이하의 영역에서는 반응기체인 산소가스의 유량 변화에 따른 성장속도의 변화가 크지 않으나, 800 °C와 900 °C의 기판온도에서는 산소가스의 유량 변화에 따라 성장속도의 변화가 있음을 알 수 있다. 또한 기판의 온도가 증가할수록 실리콘 산화박막의 성장속도는 증가하여, 500 °C에서 40 sccm의 산소가스 유량일 때 성장속도는 2.53 Å/min에서 900 °C일 때에는 8.44 Å/min으로 증가하고 있다.

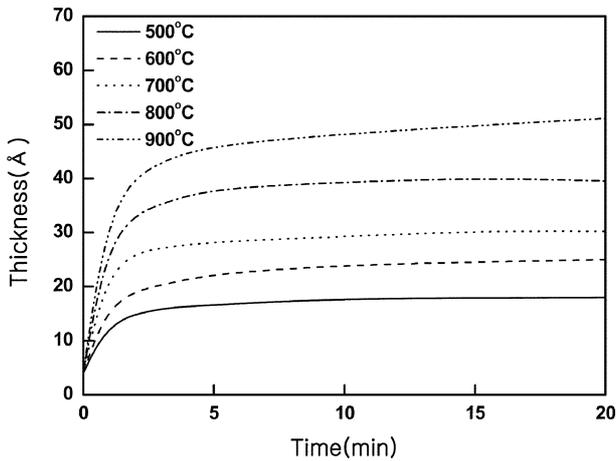
일반적으로 실리콘 산화박막은 1,040~1,080 cm⁻¹에서 Si-O의 stretching mode와 445~450 cm⁻¹에서 Si-O의 rocking mode가 나타난다[11]. Si-O stretching mode(800~1,300 cm⁻¹)의 모양은 SiO_x에서 양론비와 Si-O bond strain에 민감한 영향을 끼친다. 즉 SiO_x에서 Si-O stretching mode의 파수가 x의 선형적인 함수로써 더 높은 파수 영역으로 이동하기 때문에 SiO_x의 산화 정도에 대한 정보를 제공한다. 이러한 peak의 낮은 파수로의 이동은 주로 산소 결핍으로 인해 발생하게 된다[12]. Fig. 4는 20분간 급속열산화법에 의해 제조된 산화박막의 Si-O stretching mode의 흡광도 피크의 위치를 보여주고 있다. 1,050~1,064 cm⁻¹의 흡광도 피크를 가지며, 산소가스의 유량이 증가할수록 Si-O 흡광도 피크가 높은 파수로 이동되고 있다. 기판의 온도 증가에 따라 Si-O의 피크 위치가 높은 파수로 이동되고 있으며, 기판의 온도가 증가할수록 급속열산화에 의해 Si/SiO₂ 계면에서 발생하는 산소 결핍이 해소된다고 볼 수 있다.



(a) 20sccm



(b) 30sccm



(c) 40sccm

Fig. 2. Effects of process temperature and oxygen flow rate in LPRTO on the grown thickness of silicon oxide.

3-2. 플라즈마화산산화법에 의한 실리콘 산화박막

플라즈마화산산화법을 이용하여 플라즈마 출력과 산소가스 유량 변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장특성에 대해 알아보았다. 일반적으로 플라즈마화산산화법으로 박막을 성장시키는 경우 성장속도에 영향을 미치는 주요 변수들은 플라즈마 세기, 기판의 온도, 반응

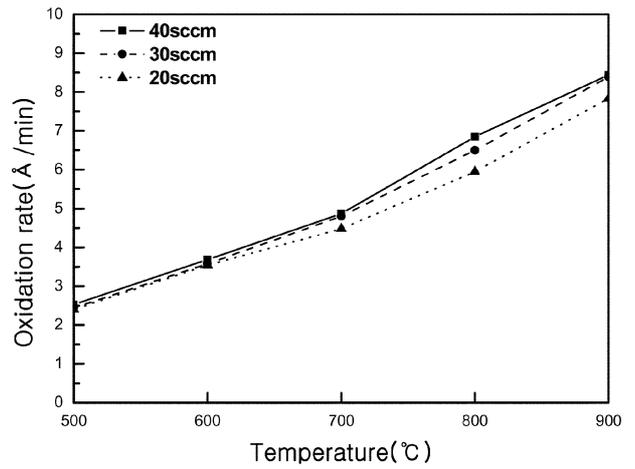


Fig. 3. Dependence of silicon oxide growth rate (LPRTO) on oxidation temperature and oxygen flow rate.

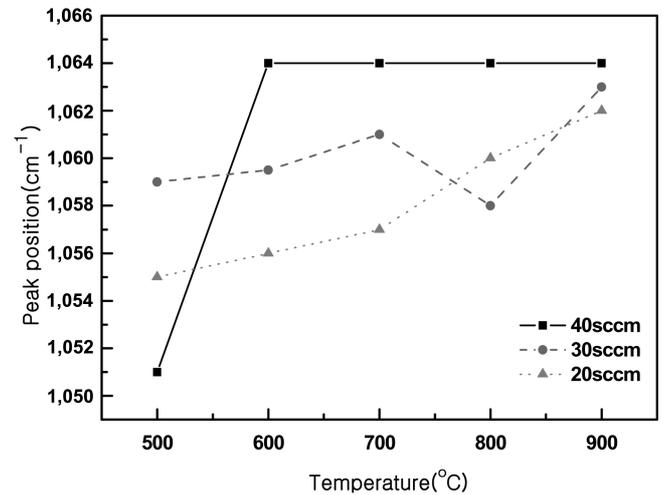
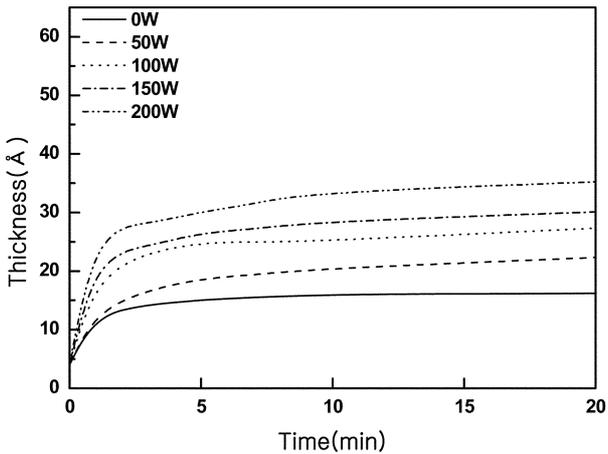
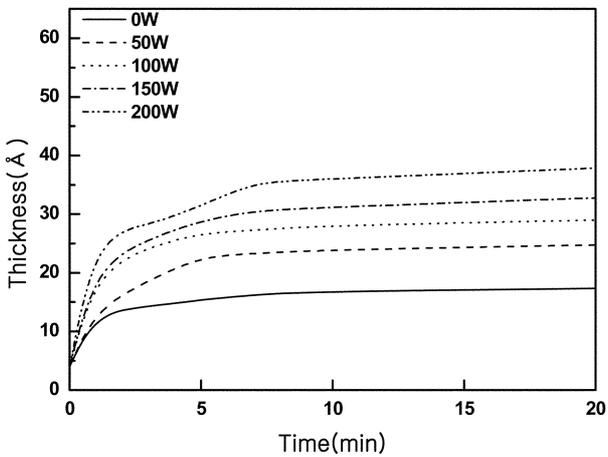


Fig. 4. Peak positions of Si-O stretching mode for silicon oxide grown by LPRTO under the various process conditions.

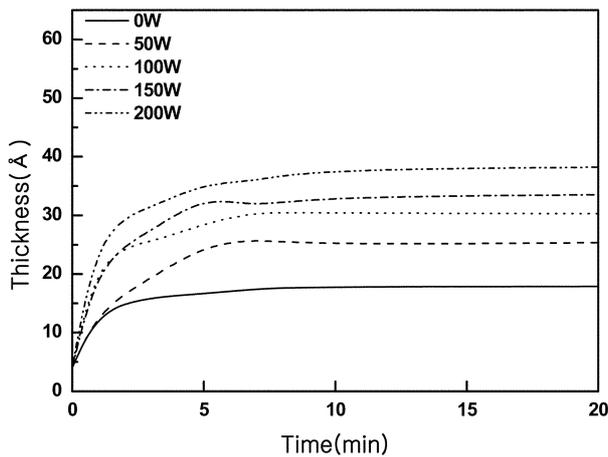
기체의 유량 및 반응기내의 압력 등에 의해 결정된다[13-15]. 본 실험에서는 반응기내의 압력과 기판의 온도는 일정하게 유지시켰으며, 플라즈마 출력과 플라즈마 반응기내 산소가스의 유량 변화가 실리콘 산화박막 성장에 미치는 영향을 관찰하였다. Fig. 5는 산소가스 유량이 20, 30, 40 sccm으로 변화할 때 플라즈마 세기에 따른 실리콘 산화박막의 두께 측정 결과이다. 플라즈마 출력의 증가에 따라 실리콘 웨이퍼에 성장된 산화박막의 두께는 증가하고 있으며, 이는 플라즈마 출력이 증가함에 따라 반응가스의 이온화 율의 증가로 인해 산화박막의 성장 두께가 증가하는 것으로 사료된다. Fig. 5(c)에서는 200 W의 플라즈마 출력과 40 sccm의 산소기체 유량으로 초기 5분간의 플라즈마화산산화법에 의해 3.5 nm의 실리콘 산화박막이 제조되며, 이후 20분까지 3.8 nm의 실리콘 산화박막이 성장되는 것을 보여준다. 플라즈마화산산화법에 의한 산화 초기에는 산화박막의 성장이 빠르게 진행되나, 급속열산화에서 보여주는 결과와 같이 산화박막의 성장이 포화상태에 이르게 되어 성장이 둔화됨을 보여주고 있다. Fig. 6은 산화박막이 포화상태에 이르는 조건인 5분까지의 산화 시간 동안 산소의 유량 변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장속도를 나타내었다. 결과에서 보듯이 반응실 내로 유입되는 산



(a) 20sccm



(b) 30sccm



(c) 40sccm

Fig. 5. Effects of RF-power and oxygen flow rate in remote plasma oxidation on the grown thickness of silicon oxide.

소가스의 유량 증가에 따라 성장속도가 증가함을 보이고 있다. 산소가스의 유량이 40 sccm인 경우 플라즈마 세기가 50, 100, 150, 200 W로 증가함에 따라 각각 4.16 Å/min, 4.91 Å/min, 5.87 Å/min, 6.29 Å/min 성장속도로 증가한다.

Fig. 7은 FT-IR 분석을 통해 20분간의 산화시간 동안 기판의 온

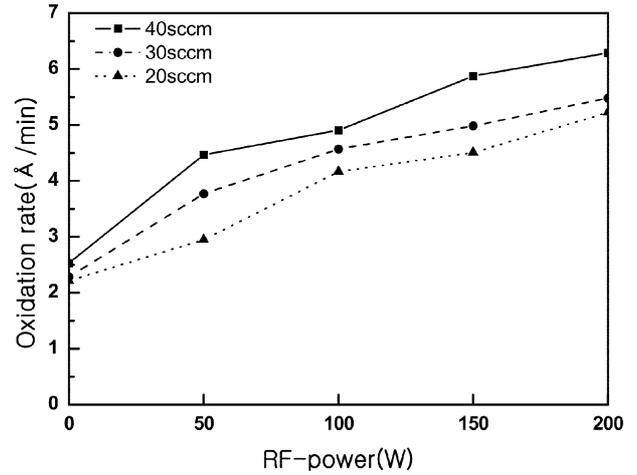


Fig. 6. Dependence of silicon oxide growth rate (LPRTO) on RF-power and oxygen flow rate.

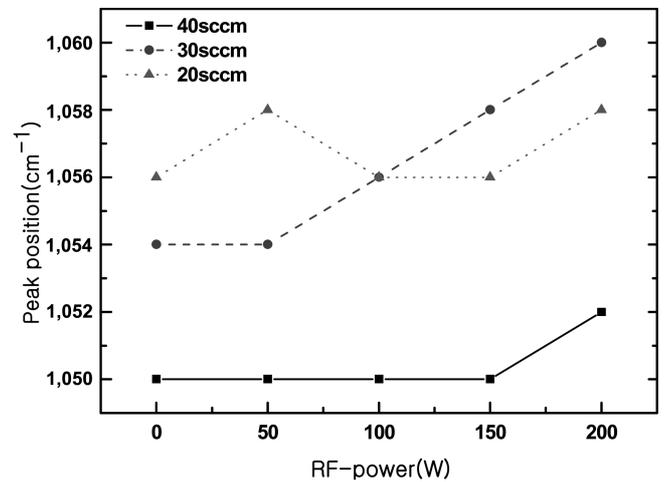


Fig. 7. Peak position of Si-O stretching mode for silicon oxide grown by remote plasma oxidation as a function of RF-power and oxygen flow rate.

도가 500 °C이고 압력이 200 mTorr일 때, 플라즈마 출력과 산소가스 유량 변화에 따른 실리콘 산화박막이 갖는 Si-O stretching mode의 피크 변화를 나타내었다. 반응가스인 산소가스의 유량 변화와 플라즈마 출력의 변화에 따라 플라즈마확산산화법에 의해 성장된 산화박막은 1,050~1,060 cm⁻¹의 피크를 보이고 있다. 플라즈마 출력의 증가에 따라 Si-O stretching mode의 피크 위치는 높은 파수로 이동하고 있다.

3-3. 저압급속열산화법과 플라즈마확산산화법에 의한 실리콘 산화박막 비교

Fig. 8(a)는 급속열산화에 의해 성장된 산화박막의 굴절율을 나타내고 있다. 기판의 온도와 반응기체인 산소가스의 유량에 따라 굴절률이 1.454~1.457의 범위로 나타났다. 급속열산화 온도 증가에 따라 굴절률이 증가하고 있으며, 온도의 증가에 따라 기판의 실리콘의 산화시 부피 팽창으로 인하여 발생하는 압축 응력이 완화되어 산화박막이 더 조밀해졌음을 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 8(b)는 플라즈마확산산화법에 의해 성장된 산화박막의 굴절율을 나타내고 있으며, 플라즈마 출력과 반응기체인 산소가스의 유량에 따라

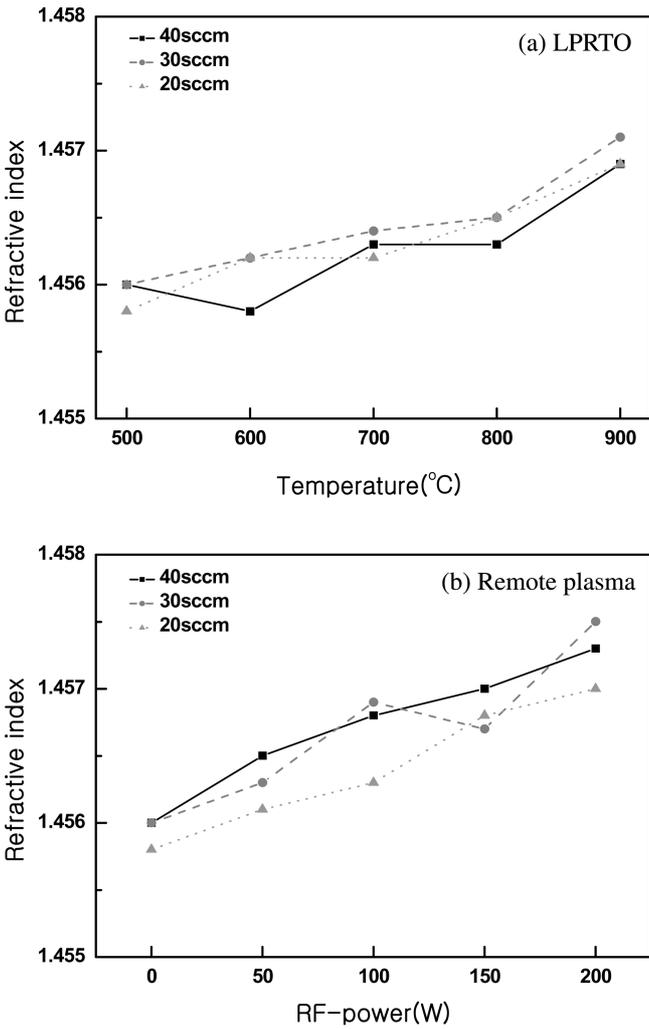


Fig. 8. Refractive index of silicon oxide grown by (a) LPRTO at various process temperatures and (b) remote plasma oxidation at various RF powers.

1.455~1.458의 범위로 나타났다. 실험조건에 따라 굴절률이 서로 다른 값을 갖는 이유는 산화박막 형성 시 플라즈마에 의해 양으로 하전된 산소이온이 산화박막 내에 형성된 결합인 Si/SiO₂ 계면으로 이동한 것으로 사료된다.

Fig. 9는 900 °C이고 산소기체의 유량이 40 sccm에서 급속열산화에 의해 5.1 nm의 두께로 성장된 산화박막과 RF 출력이 200 W, 산소기체의 유량이 40 sccm일 때 플라즈마확산산화법에 의해 3.8 nm 두께로 성장된 산화박막의 ESCA 분석 결과이다. 저압급속열산화법에 의해 성장된 실리콘 산화박막은 98.6 eV와 103.0 eV에서 실리콘 기판과 산화박막의 Si(2p) 피크가 나타났다. 532.5 eV에서 O(1s)의 결합에너지가 나타나며, 열산화법에 의해 제조된 산화박막과 결합에너지가 일치하고 있다[16]. 충분한 산화시간으로 산화박막 내의 실리콘 원자가 완전히 산화되었으며, 산화박막 내에 존재하는 결합들의 재결합으로 인한 것으로 사료된다. 플라즈마확산산화법에 의해 성장된 실리콘 산화박막은 98.0 eV와 532.1 eV에서 실리콘 기판과 산화박막의 Si(2p) 피크를 나타내며, 532.1 eV에서 O(1s)의 결합 에너지를 나타낸다. 플라즈마확산산화법에 의해 성장된 실리콘 산화박막은 실리콘 주위에 산소결핍에 의해 Si(2p)와 O(1s)의 결합 에너지가 열산화법에 의해 제조된 산화박막보다 작게 나타나고 있다.

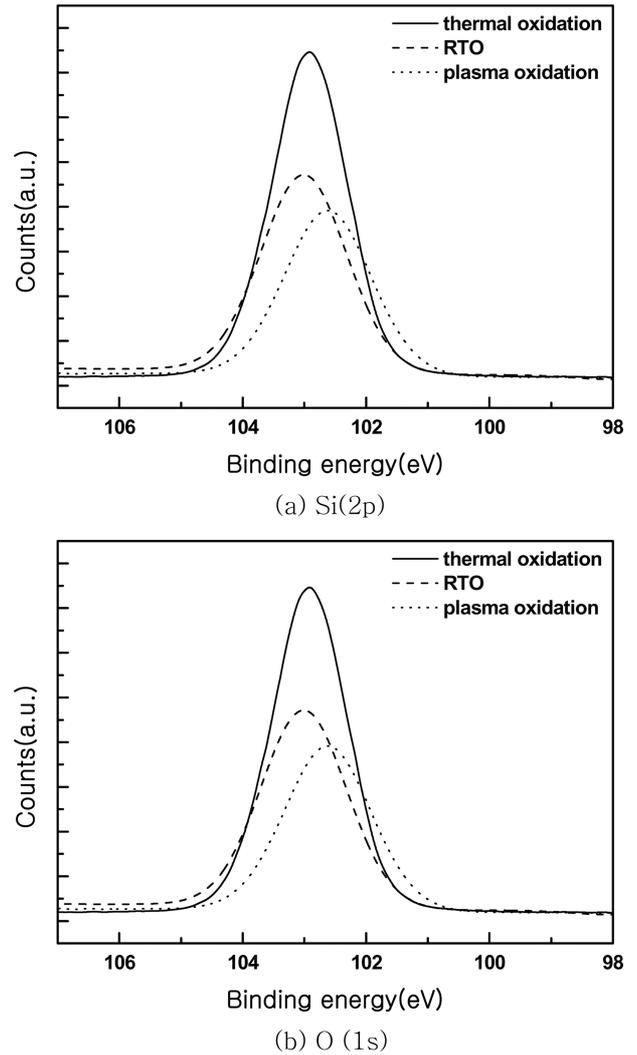


Fig. 9. Comparison of binding energies of (a) Si(2p) and (b) O(1s) analyzed from several silicon oxides grown by a LPRTP, a remote plasma oxidation and a conventional thermal oxidation (standard).

$$\delta = E_B[\text{Si}(2p)]_{\text{oxide}} - E_B[\text{Si}(2p)]_{\text{substrate}} \quad (1)$$

실리콘 산화박막의 SiO_x 조성비는 Si(2p) 산화박막의 결합에너지와 Si(2p) 실리콘 기판의 결합에너지로부터 $\delta(\text{eV}) = 2.2x$ 를 이용하여 얻을 수 있다[17]. 저압급속열산화법에 의해 성장된 산화박막은 SiO₂로 나타나며, 플라즈마확산법에 의해 제조된 산화박막은 SiO_{2.09}로 나타나고 있다. MOS 트랜지스터의 게이트 박막으로 실리콘 산화박막의 초박막화에 대응하기 위해서 플라즈마확산산화법에 의해 성장된 실리콘 산화박막은 적절한 열처리 과정을 통해 열산화법에 의해 제조된 산화박막과 같은 물성 확보가 필요로 할 것이다.

4. 결 론

저압급속열산화법을 이용하여 기판의 온도와 산소가스의 유량 변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장특성과 플라즈마확산산화법을 이용하여 플라즈마 출력과 산소의 유량의 변화에 따른 실리콘 산화박막의 성장특성에 대해 알아보았다. 급속열산화법을 이용한 실리콘

산화박막의 성장속도는 기판의 온도가 증가할수록 2.54 Å/min에서 8.54 Å/min으로 증가하고 있으며, 플라즈마확산산화법에 있어서는 플라즈마 출력과 산소의 유량 증가에 따라 성장속도가 증가함을 알 수 있었다. 산화시간이 5분 이후에는 급속열산화법과 플라즈마확산산화법에서 산화박막의 성장이 둔화됨을 확인하였다. 급속열산화에 의해 성장된 실리콘 산화박막의 1,064 cm⁻¹에서 Si-O stretching mode의 흡광도 피크를 나타낸다. 열산화법에 의해 제조된 산화박막과 Si(2p)와 O(1s)의 결합에너지 비교를 통해 SiO₂의 양론비를 갖는 실리콘 산화박막이 형성됨을 확인할 수 있었다. 플라즈마확산산화법에 의해 성장된 산화박막은 1,050~1,060 cm⁻¹의 FT-IR 결과를 보이고 있다. 열산화법과 비교해 Si(2p)와 O(1s)의 결합에너지가 작게 나타나고 있으며, 산화박막 내에 양으로 하전된 산소이온으로 실리콘 주위에 산소 결핍으로 나타난 것으로 볼 수 있다.

참고문헌

1. Batey, J. and Tierney, E., "Low-Temperature Deposition of High-quality Silicon Dioxide by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition," *J. Appl. Phys.*, **60**(9), 3136-3145(1986).
2. Fountain, G. G., Rudder, R. A., Hattangrady, S. V., Markunas, R. J. and Lindome, P. S., "Low Interface State Density SiO₂ Deposited at 300 °C by Remote Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition on Reconstructed Si Surface," *J. Appl. Phys.*, **63**(9), 4744-4746(1988).
3. Landheer, D., Xu, D. X., Tao, Y. and Sproule, G. I., "Effect of Power on Interface and Electrical Properties of SiO₂ Films Produced by Plasma-Enhanced Chemical-Vapor Deposition," *J. Appl. Phys.*, **77**(4), 1600-1606(1995).
4. Furukawa, K., Liu, Y., Gao, D., Nakashima, H., Uchino, K. and Muraoko, K., "In Situ FT-IR Reflective Absorption Spectroscopy For Characterization of SiO₂ Thin Films Deposited Using Sputtering-type Electron Cyclotron Resonance Microwave Plasma," *Appl. Surf. Sci.*, **121/122**, 228-232(1997).
5. Welsch, E., Walther, H. G., Schafer, D., Wolf, R. and Muller, H., "Correlation Between Morphology, Optical Losses and Laser Damage of MgF₂-SiO₂ Multilayers," *Thin Solids Films.*, **156**(1), 1-10(1988).
6. Rohles, S., Tieh, E. and Nguyen, B. C., "Moisture Resistance of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited Oxides Used for Ultralarge Scale Integrated Device Applications," *J. Electrochem. Soc.*, **142**(2), 580-585(1995).
7. Pliskin, W. A. and Lehman, H. S., "Structural Evaluation of Silicon Oxide Films," *J. Electrochem. Soc.*, **112**(10), 1013-1019(1965).
8. Chang, K. N., Li, C. H., Fahn, F. J., Tsai, J. Y., Yeh, T. H., Wang, S. W. and Yang, J. Y., "Influence of Precleaning Process on the Gate Oxide Film Fabricated by Electron Cyclotron Resonance Plasma Oxidation," *J. Electrochem. Soc.*, **144**(1), 311-314(1997).
9. Nayar, V., Botd, I. W., Goodall, F. N. and Arthur, G., "Low Temperature Oxidation of Crystalline Silicon Using Excimer Laser Irradiation," *Appl. Surf. Sci.*, **36**(1-4), 134-140(1989).
10. Fiegna, C., Iwai, H., Wada, T., Saito, M., Sangiorgi, E. and Ricco, B., "Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm: Methodology, Device Structures, and Technology Requirements," *IEEE Trans. Electron Devices*, **41**(6), 941-951(1994).
11. Queeney, K. T., Weldon, M. K., Chang, J. P., Chabal, Y. J., Gurevich, A. B., Sapjeta, J. and Opila, R. L., "Infrared Spectroscopic Analysis of Si/SiO₂ Interface Structure of Thermally Oxidized Silicon," *J. Appl. Phys.*, **87**(3), 1322-1330(2000).
12. Lucovsky, G., Manitini, M. J., Srivastava, J. K. and Irene, E. A., "Low-Temperature Growth of Silicon Dioxide Films: A Study of Chemical Bonding by Ellipsometry and Infrared Spectroscopy," *J. Vac. Sci. Technol. B.*, **5**(2), 530-537(1987).
13. Carl, D. A., Hess, D. W. and Lieberman, M. A., "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).
14. Shufflebotham, P. K., Thomson, D. J. and Card, H. C., "Behavior of Downstream Plasmas Generated in a Microwave Plasma Chemical-Vapor Deposition Reactor," *J. Appl. Phys.*, **64**(9), 4398-4403(1988).
15. Chau, T. T. and Kao, K. C., "Optical Emission Spectra of Microwave Oxygen Plasma and Fabrication of SiO₂ Films," *J. Vac. Sci. Technol. B.*, **14**(1), 527-532(1996).
16. Coleman, W. J., "Evolution of Optical Thin Films by Sputtering," *Appl. Opt.*, **13**(4), 946-951(1974).
17. Raider, S. I. and Flitsch, "X-Ray Photoelectron Spectroscopy of SiO₂-Si Interfacial Regions: Ultrathin Oxide Film," *IBM J. Res. Dev.*, **22**(3), 294-303(1978).