

실리카 에어로겔의 층간 절연막으로의 응용

정상배, 박형호
연세대학교 세라믹공학과

1. 서 론

반도체 소자의 성능 향상은 집적도의 증가로 나타낼 수 있는데 현재 제조되는 소자의 feature size는 0.18 μm 를 지나고 있고 그 감소 추세는 점점 가속화되고 있다. 이는 필연적으로 배선 물질간의 선폴이 줄어들게 되어 종래에는 크게 문제시되지 않았던 배선 물질간의 정전용량이 전체 정전용량을 주도하게 된다. 이에 따라 신호 지연(propagation delay)과 전기적인 신호의 상호 간섭(crosstalk)이 발생하게 된다. 따라서 배선 물질의 저항과 배선 물질간 절연물질의 유전 상수의 한계가 소자 집적화에 있어서 새로운 장애 요인으로 대두되고 있다. 따라서 기존의 Al보다 낮은 비저항을 갖는 배선 물질과 SiO_2 보다

낮은 유전 상수를 갖는 유전체에 대한 기술 개발을 요구하게 되었다. Fig. 1은 저유전 물질의 시장 발전 추이를 도표화한 것인데 막대는 단기간의 시장 잠재력을, 선은

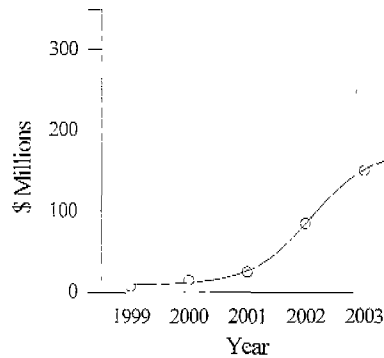


Fig. 1. Forecast of short-term potential (columns) and actual (line) markets for low-k materials.

Table 1. Low-k Material Candidates for ULSI Interconnect.

	Dielectric	Dielectric constant	Water absorption	Stress (Mpa)	Gap fill (μm)	Cure temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Weight loss at 450 $^{\circ}\text{C}$
Inorganic	FSG (silicon oxyfluoride, SixOFy)	3.4-4.1	<1.5	-130	<0.35	no issue	none
	HSQ (hydrogen silsesquioxane)	2.9	<0.5	70-80	<0.10	350-450	<3
	silica aerogel	1.3-2.5	-	0	<0.25	400	none
Organic	Fluorinated polyimide	2.6-2.9	1.5	2	<0.5	350	<0.1
	Poly(arylene) ether	2.6-2.8	<0.4	60	<0.15	375-425	<1.0
	Parylene AF4 (aliphatic tetrafluorinated poly-p-xylylene)	1.548	-	100	0.18	420-450	0.5
	PTFE (polytetrafluoro-ethylene)	1.9	<0.01	25-27	<0.30	360-390	0.8
	DVS-BCB (divinyl siloxane bisbenzo -cyclobutene)	2.65	<0.2	30-35	<0.22	300	<1.0
	Aromatic hydrocarbon	2.65	<0.25	55-60	<0.05	400-450	<1.0
	Hybrid-silsesquioxanes	<3.0	0	30-40	<0.1	450	6

Table 2. Requirements for Low-k Dielectric.

박막 특성	제조 공정
유전 상수 <2.5	Integration -금속 (Ta, TaN, TiN, Cu), 산화막, 질화막과의 좋은 접착성 -CMP와의 호환성 -질화막, 산화막, 질산화막과의 선택적 식각 -보호막 사용의 최소화 -O ₂ ash와 용매와의 호환성 -유독 용매의 사용 억제
열적 안정성	
높은 열전도도	
425 °C 이상에서 안정성	
낮은 열팽창 계수	
전기적 특성	
높은 신뢰성	
낮은 누설 전류	
높은 절연 파괴 전장	
낮은 손실률	
낮은 전하 포획	
박막 조성	
낮은 박막 응력	
>2 μm thick cracking threshold	

실제 시장 규모를 나타낸다.¹⁾ 그림에서 보듯이 층간절연막에 대한 시장은 점점 커지고 있으며 2003년에는 실제 시장 규모가 1억 5천만불 정도 될 것으로 예상하고 있다.

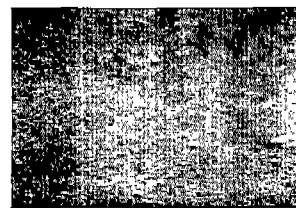
이러한 저유전 층간절연막에 대한 연구는 Table 1에 나타낸 것처럼 유기물계와 SiO₂를 기본으로 한 무기물계로 나눌 수 있다.²⁾ 유기물계는 poly(arylene) ethers (PAE), benzocyclobutene (BCB) 및 aromatic hydrocarbon 등이 있고 무기물계는 hydrogen silsesquioxane (HSQ), fluorinated oxides, 실리카 에어로겔 등이 있다. Table 2에 층간 절연막으로의 응용을 위해 요구되는 성질을 나열하였는데 저유전 박막은 유전 특성과 열적, 기계적 안정성뿐만 아니라 기존의 반도체 공정에서 사용되는 식각이나 평탄화 공정과도 호환성이 있어야 한다.²⁾ 유기물계 저유전 박막은 유전율은 낮으나 중합체 특유의 열경화로 인한 고응력, 열적 불안정성 등의 문제점이 있으며 무기물계 저유전 박막에서 fluorinated oxide 등은 F로 인한 수분흡착 및 배선물질의 부식 등이 문제점으로 대두되고 있다. 연구 개발 중인 저유전 박막 중에서 실리카 에어로겔은 특유의 다공성 구조로 인해 여타 개발 중인 다른 물질보다 가장 유전 상수가 낮은 물질로 초고집적 소자에서 그 응용 가능성이 논의되고 있는 물질이다.

실리카 에어로겔 박막은 금속 알콕사이드를 출발물질로 하여 가수분해(hydrolysis)와 축·중합 반응을 거쳐 졸을 만들고 spin-coating을 통해 겔화는 진행되었으나 용매가 증발되지 않고 망목구조 사이를 채우고 있는 상태

인 습윤겔(wet-gel) 상태를 만들게 된다. 이 때 spin-coating 과정 중에 용매의 증발을 막기 위하여 제조한 sol의 용매 분위기에서 코팅을 실시하게 된다. 습윤겔 상태의 박막을 모세관 현상에 의해 망목구조가 붕괴되지 않도록 건조하면 높은 기공율을 갖는 3차원 망목구조를 얻을 수 있다. 박막의 기공율은 졸 제조에 사용되는 알콕사이드와 용매와 물의 비율, 촉매의 양과 종류, 건조 방법 등에 따라 달라지게 되며 이에 따라 1.3-2.5의 유전 상수를 갖는 저유전 박막을 제조할 수 있게 된다.³⁻⁴⁾

습윤겔 상태의 박막 안에 존재하는 용매를 망목 구조의 붕괴없이 제거하는 방법은 크게 초임계 건조에 의한 것과 표면 개질에 의한 방법으로 나눌 수 있다.⁵⁻⁶⁾ 일반적으로 물질의 상태는 기체, 액체, 그리고 고체로 나눌 수 있는데 액체 상태의 물질을 고온, 고압으로 유지시키게 되면 더 이상 액체 상태의 성질을 나타내지 못하고 기체와 액체의 중간 상태인 초임계 유체 상태로 전이하게 된다. 초임계 건조법은 이를 이용하여 건조 중에 발생하는 기체와 액체의 계면을 발생시키지 않고 기공 안에 포함되어 있는 용매를 초임계 유체로 전이시켜 건조시키는 방법이다. 표면 개질에 의한 방법은 건조 과정 전에 망목 구조를 이루고 있는 입자들의 표면에 존재하는 수산기를 미 반응기로 치환시킨 후 건조 후에 springback 효과에 의해 3차원 망목 구조를 이루게 하는 방법이다.

SEM



0.5 μm

AFM

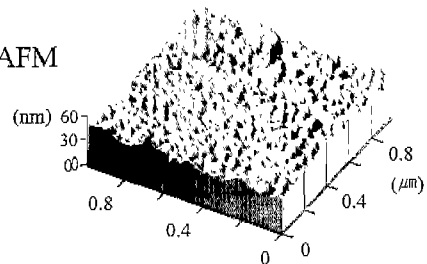


Fig. 2. SEM and AFM images of SiO₂ aerogel film.



위와 같은 방법으로 제조된 실리카 에어로겔 박막은 입자의 분포형태 및 미세구조에 따라 박막의 기공율이 결정되어지게 되고 이로부터 서로 다른 유전특성을 나타내게 되므로 이의 구조에 대한 이해가 매우 중요하다 하겠다. 또한 층간절연막으로의 응용을 위해서는 박막의 전기적 특성뿐만 아니라 집적화를 위한 평탄화 및 식각기구에 대한 이해도 이루어져야 한다. 본 고에서는 이러한 고찰을 통해 실리카 에어로겔의 층간절연막으로서의 응용 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 실리카 에어로겔의 구조적 특성

3,000 rpm 20 초의 스핀 코팅 조건에서 제조된 박막의 전형적인 SEM과 AFM의 이미지를 나타낸 Fig. 2에서와 같이 SiO₂ 에어로겔은 나노크기의 구형 입자가 무질서하게 나열된 구조임을 알 수 있다. AFM 이미지를 통해 관찰된 구형 입자들의 크기는 직경 약 10-30 nm의 분포를 나타내었다. 박막의 미세 구조에 미치는 스핀 코팅의 영향을 분석하기 위하여 박막 및 monolith 형태의 에어로겔을 제조하여 TEM 분석을 실시하였고 이를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 박막의 경우와 monolith의 경우 거의 동일한 형상을 나타내는 것으로부터 SiO₂ 에어로겔 박막의 기본 구조는 스핀 코

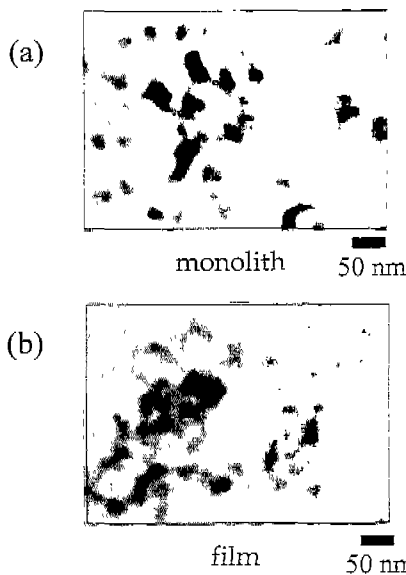


Fig. 3. TEM photographs of constituent particles of SiO₂ aerogel ; (a) monolith and (b) thin film.

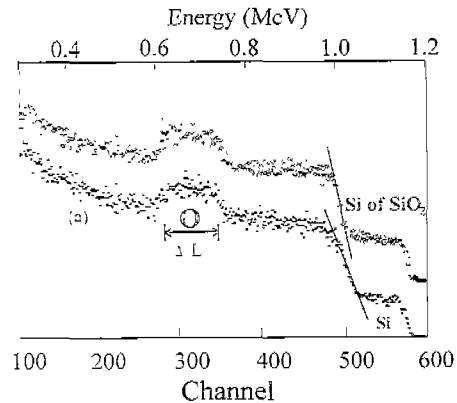
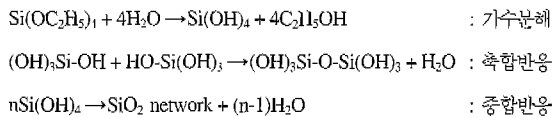


Fig. 4. Typical 2 MeV He⁺⁺ RBS spectra of (a) SiO₂ aerogel film with 1000 nm thickness and (b) thermally grown SiO₂ with 300 nm thickness.

팅에 의한 영향보다는 졸-겔 반응에 더욱 의존함을 확인할 수 있었다. 이로써 제조된 SiO₂ 에어로겔 박막의 미세구조는 10-30 nm 크기의 구형입자들이 무질서하게 얽혀 다공 구조를 형성하는 것임을 확인할 수 있다. SiO₂ 에어로겔 박막의 다공성에 대한 가시적인 비교를 위하여 두께 1000 nm의 SiO₂ 에어로겔 박막의 전형적인 RBS 스펙트럼을 두께 300 nm의 열산화 SiO₂ 박막의 spectra를 함께 Fig. 4에 나타내었다. RBS 스펙트럼에서 각 원소 피크의 energy width(ΔE)는 박막의 외형적인 두께와 관계없이 박막에 존재하는 원소의 존재량에 의하여 결정되는데, 두께 1000 nm의 SiO₂ 에어로겔 박막과 300 nm의 열산화 박막의 스펙트럼이 이러한 면에서 서로 매우 일치함을 알 수 있다. 이는 SiO₂ 에어로겔 박막의 다공성을 모식적으로 나타내어주는 것으로 RBS 스펙트럼의 정량적 분석으로부터 SiO₂ 에어로겔 박막의 밀도는 0.74 g/cm³로 (열산화 SiO₂의 밀도는 2.27 g/cm³) 약 68 %의 기공율을 가지는 것으로 나타났으며 본 실험에서의 반복된 측정을 통하여 0.65에서 0.75사이의 변이를 보였다. 그러나 이러한 SiO₂ 에어로겔 박막은 동일한 조성의 SiO₂ 졸에 의해 제조되는 monolith 에어로겔의 약 95 % 기공율에 비하면 기공율이 훨씬 더 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 박막의 형성을 위한 스핀 코팅 과정시 높은 스핀 속도에 의해 발생하는 원심력에 의한 박막 형태의 습윤겔 형성이라는 근본적인 박막 형성 과정에서 그 원인을 찾을 수 있다. RBS

분석을 통하여 SiO₂ 에어로겔 박막의 구성 원소간 상대적인 조성비 O/Si, C/Si는 각각 2.5와 0.9로 구해진다. SiO₂ 에어로겔 박막 형성의 기구는 아래와 같은 줄-겔 기본 반응식으로 파악할 수 있는데, 구성 원소중 상당량의 탄소는 박막의 출발 물질로 사용되는 유기전구체 TEOS와 초임계조건에서 사용되는 용매인 IPA의 사용으로 인한 잔류 유기물로 생각할 수 있다.³⁾



또한 O/Si 비가 열산화 SiO₂에서의 2에 비해 큰 것으로부터 박막 내에 상당량의 Si-OH와 물리적으로 흡착된 H₂O가 존재함을 추정해 볼 수 있다. 이러한 잔류 유기물과 수산기의 존재를 확인하기 위하여 FT-IR 분석을 실시하였다. Fig. 5에 전형적인 IR spectra를 나타내었는데 2815-2970 cm⁻¹에서 나타나는 큰 피이크를 통하여 C-H 당김 진동(stretching vibration)에 의한 -CH₃와 -CH₂- 등 유기물의 존재를 확인할 수 있다. 또한 1370 cm⁻¹에서도 C-H 변형 진동(deformation vibration)에 의한 피이크가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 1450 cm⁻¹에서 -CH₂-의 변형 진동에 의한 피이크도 관찰되는 것으로부터 TEOS의 불완전한 가수분해에 의해 남아 있는 에틸기와 IPA에 기인한 유기물을 확인할 수 있다. 그리고, 3400-3750 cm⁻¹에서 나타나는 피이크들은 -OH의 O-H 당김 진동에 의한 것으로 각각 molecular H₂O (3400 cm⁻¹), paired -OH (3540 cm⁻¹), hydrogen-bonded -OH (3650 cm⁻¹), sin-

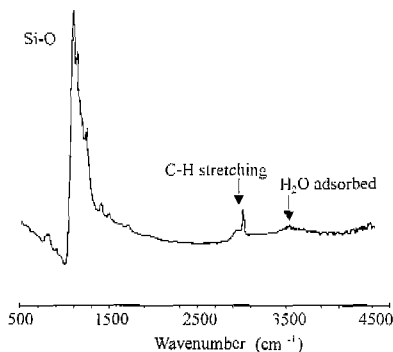


Fig. 5. Typical FT-IR absorbance spectrum of SiO₂ aerogel film.

gle -OH (3750 cm⁻¹)의 혼합으로 정의할 수 있으며, TEOS가 가수 분해되어 축합(polymerization)되는 과정에서 반응에 참여하지 못한 -OH 결합이 존재하는 것임을 확인할 수 있다. 이로부터 SiO₂ 에어로겔 박막은 Si-O 골격 외에도 표면의 화학종으로서 Si-OH, Si-OR, 흡착된 H₂O 등으로 구성되어져있음을 알 수 있다.

3. 실리카 에어로겔의 전기적 특성

증착된 SiO₂ 에어로겔 박막과 여러 가지 후속 처리에 따른 박막의 정전 용량을 MIS 구조에서 측정하였다. 소자 내에서 층간절연막으로서의 응용에 가장 중요한 관건은 저유전 특성으로서 낮은 유전상수와 유전 손실 계수가 무엇보다도 중요하다.

증착된 SiO₂ 에어로겔 박막과 후속 열처리에 따른 박막의 정전 용량을 1 MHz에서 측정하였다. Fig. 6에서 보듯이 전극의 면적과 관계없이 약 2.1정도의 낮은 유전상수를 나타내고 있다. 이 값은 Table 1에 정리한 기존의 혹은 현재 연구중인 여러 저유전 물질 중 가장 낮은 유전상수에 해당되며 또한 feature size 0.18 μm이하 집적도 1 giga급에서 요구되는 2.4의 유전율보다도 작은 값으로 층간절연막으로 응용시 요구되는 저유전 특성면에서는 매우 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 더욱 박막의 유전 상수는 450°C의 열처리를 통하여 1.9-2.0으로 더욱 감소됨을 볼 수 있었는데 이는 잔류 유기물의 제거에 의한 것이다. 측정된 SiO₂ 에어로겔 박막의 유전 상수는 굴절을 측정을 통한 광학 유전 상수 (ε = n²)와 비교되어질 수 있다. 굴절율은 전자기파중 가시광선영역,

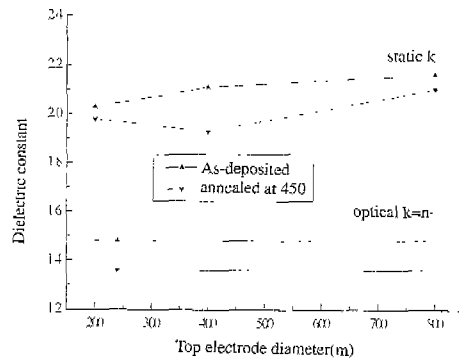


Fig. 6. Dielectric constant of SiO₂ aerogel films in MIS structure.

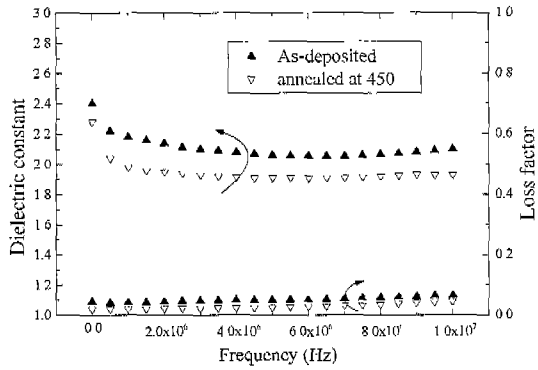


Fig. 7. Frequency dependent dielectric constant and loss factor of SiO₂ aerogel film.

632.8 nm의 파장을 갖는 He-Ne laser를 광원으로 하는 ellipsometer로 측정하였는데 일반적으로 고유결합 물질의 경우 광학 유전 상수는 굴절율의 제곱의 값을 가진다. 즉 실제 측정 범위인 1 MHz에 비해 매우 짧은 파장을 가지는 가시광 영역에서는 이온 결합으로 인한 화학종의 박막 전체 유전 분극에 대한 기여는 매우 미미하다. 따라서 SiO₂ 에어로겔 박막의 유전 분극은 내부 표면의 다양한 화학종들로 인해 electronic, ionic 뿐만 아니라 dipolar polarization도 그 일부를 이룰 것으로 예상되었는데 이는 광학 유전상수와 측정된 정전 유전상수의 비교를 통하여 확인되어질 수 있다.

Fig. 7에 유전 상수와 손실 계수의 주파수 의존성이 나타나 있다. 일반적인 산화막의 유전 상수 및 손실 계수는 주파수가 증가함에 따라 감소한다. 본 실험에서도 유사한 양상을 보였는데 MHz단위까지의 감소가 박막내의 dipolar polarization에 의한 것임을 450 °C에서 열처리한 박막의 측정을 통하여 확인할 수 있다. SiO₂ 에어로겔 박막은 열처리를 통하여 보다 낮은 유전 상수와 손실 계수 등 보다 나은 유전 특성을 나타낸다.

Fig. 8에 SiO₂ 에어로겔 박막의 전형적인 누설 전류 특성을 전류-전압(current-voltage)의 관계로 나타내었다⁷⁾. log J - log E의 비례 관계로부터 누설 전류 밀도(leakage current density)의 거동은 초기에 급격한 선형 증가를 보이는 저전압 영역과 완만한 증가를 보이는 비선형의 고전압 영역으로 나누어 볼 수 있다. 저전압 선형영역의 전도기구는 ohmic 전도 특성으로 이는 박막내의 전자나 정공 또는 이온에 의한 표면 전하(surface charge)의 전도현

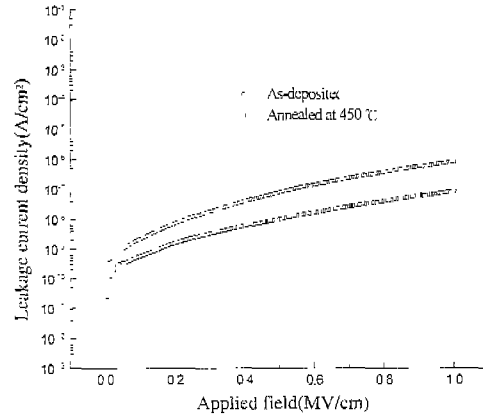


Fig. 8. Leakage current density with the function of applied field in SiO₂ aerogel film.

상이며 $I = qAn\mu V/L$ 의 관계를 갖는다. 본 실험의 log J - log E plot에서는 열처리 전후에 각각 1.05와 1.17의 기울기를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 누설 전류의 선형 특성은 열처리전 박막의 경우 80 kV/cm 정도부터 열처리한 박막의 경우에는 이보다 낮은 44 kV/cm부터 선형 거동으로부터 벗어남을 알 수 있다. 이는 박막 내의 불순물(C : 잔류 유기물, H : 수산기)이 이러한 선형 ohmic 특성에 기여하기 때문이다. 고전압 비선형거동은 exponential한 증가를 보이므로 이는 전극제한 (electrode limited) 전도기구인 Schottky emission, 두께 전도(bulk-limited)기구인 SCL (space charge limited) 또는 PF (Poole-Frenkel) emission중의 하나로 예상해 볼 수 있다. 그러나 본 실험에서는 Al, Au 두가지 전극에 대해 동일한 거동을 보이므로 두께 전도 기구에 의해 지배됨을 알 수 있다. 두께 전도기구인 space charge limited 또는 Poole-Frenkel

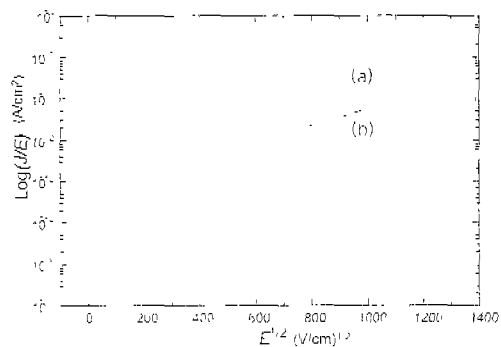


Fig. 9. Leakage current of SiO₂ aerogel film in high field region : (a) as deposited and (b) annealed at 450 °C (log J/E vs log E^{1/2}).

emission은 각각 $\log(J/E) - E^{1/2}$ 과 $J - V^2$ plot에서 비례의 관계를 나타낸다. Poole-Frenkel emission의 경우는 SCL 전도와는 달리 전장에 의해 열적 여기된 전자에 의한 전도(field-enhanced thermal excitation of trapped electrons to conduction band)이므로 이의 온도의존성으로 SCL 전도와 구별할 수 있는데, 본 실험에서는 측정된 curve의 fitting을 통하여 PF 전도기구를 그 주된 기구를 파악하였다. Fig. 9에 이의 관계를 나타내었는데 400 KV/cm 이상의 영역에서 매우 일치되는 비례관계를 보이고 있다.

충간절연막의 응용을 위하여는 가능한 작은 누설 전류값을 가져야한다. 본 실험에서는 SiO₂ 에어로겔 박막의 이러한 누설 전류의 값을 1 giga급에서의 동작 전압으로 예상되는 1.5 V에서 정의할 때 평균적으로 약 10⁻⁶ A/cm²의 값을 나타내며 이는 열처리를 통한 박막내의 불순물 제거를 통하여 한 단위(order)정도 낮아져 누설 전류의 특성이 개선되었음을 알 수 있다.

4. 고집적화를 위한 실리카 에어로겔의 특성

충간절연막으로의 적용을 위해서는 전기적 특성 뿐만 아니라 gap filling과 평탄화 특성 또한 우수해야 한다. 이는 다층화 구조에서 평탄화를 위해서는 etchback과 CMP와 같은 추가적인 공정이 요구되어지기 때문이다. Fig. 10에 0.8 μm의 선폭을 갖는 trench 구조에서 스핀 코팅을 한 결과를 나타내었으며 gap filling과 국부적인 평탄화가 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 즉 박막의 표면은 기판의 topology에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있고

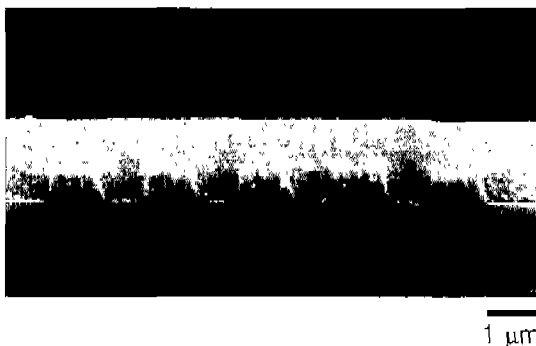


Fig. 10. Gap-fill and planarization of SiO₂ aerogel film on 0.8 μm line and space wiring.

이는 충간절연막으로의 응용에 있어 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

충간절연막으로의 응용을 위해서는 식각 거동에 대한 연구가 이루어져야 한다. 이러한 식각 거동을 살펴보기 위해 SiO₂ 에어로겔 박막을 유도 결합형 플라즈마(inductively coupled plasma) 장비를 사용하여 400W의 rf power와 -100V의 bias 전압 조건에서 식각을 하였으며 식각가스로는 10 mtorr의 CHF₃를 이용하였다.⁸⁾ 먼저 시료의 외형적인 두께만을 고려한 외형적 에칭 속도(에칭 두께/에칭 시간)와 각 시료의 원소량으로 보정한 유효 에칭 속도(열산화 SiO₂ 밀도로의 환산 두께/에칭 시간)의 비교에서 두 경우 모두 SiO₂ 에어로겔 박막이 빠른 에칭 속도를 나타내었다. 외형적 에칭 속도의 경우 열산화 SiO₂의 에칭속도가 본 실험조건에서 약 1,300~1,350 Å/min 인데 반해 에어로겔은 6,300~7,300 Å/min이었으며 이는 70%의 기공율로 환산할 경우 1,900~2,200 Å/min에 해당한다. 이는 다공성 구조를 갖는 SiO₂ 에어로겔 박막의 큰 내부 표면적에 의한 3차원적 에칭기구를 고려할 때 이차원적 에칭이 예상되는 열산화 SiO₂보다 그리 큰 값은 아닌 것으로 이는 SiO₂ 에어로겔 박막의 표면 잔류 화학종인 탄소 및 수소 등에 기인하는 것이다. 이러한 식각기구의 관찰을 위해 부분식각(partial etching)을 실시한 SiO₂ 에어로겔과 열산화 SiO₂의 XPS narrow scan spectra를 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 세기의 절대치의 비교로부터 SiO₂ 에어로겔은 열산화 SiO₂에 비해 탄화불소 잔류막을 구성하는 더 많은 양의 탄소와 불소가 표면부에 존재함을 알 수 있다. 즉 막내에 포함되어 있는 많은 탄소에 의해 SiO₂ 에어로겔의 경우 열산화 SiO₂보다 C-F 플리머 층은 용이하게 형성함으로써 높은 기공율로부터 기대되어지는 높은 식각속도를 나타내지 못하나 이러한 플리머 층은 과다에칭(overetching) 과정중 쉽게 제거되어 이후의 공정에 큰 영향을 미치지 않게 된다. 결국 SiO₂ 에어로겔의 에칭은 기존의 열산화 SiO₂의 연장선상에서 고려되어질 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 전망

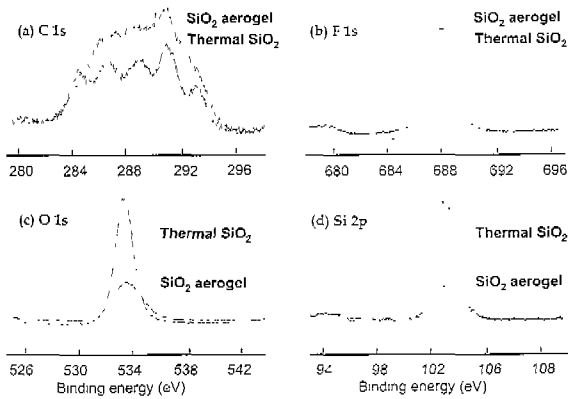


Fig. 11. Narrow scan spectra of 50% etched surface of SiO₂ aerogel and thermal SiO₂ using CHF₃ plasma: (a) C 1s, (b) F 1s, (c) O 1s, and (d) Si 2p.

실리카 에어로겔 박막의 구조 분석을 통해 10-30 nm의 크기를 갖는 기본 입자가 3차원적으로 연결되어 있으며 입자간 연결은 Si-O 결합으로 이루어져 있으나 Si-OH, Si-OR과 같은 미반응 결합들이 입자 표면에 표면화합종으로 존재하고 있음을 알 수 있었다. 실리카 에어로겔의 유전 특성은 68 %의 기공율을 가진 박막이 2.1 정도의 유전 상수를 나타내었으며 450 °C의 열처리를 통해 1.9-2.0의 유전 특성을 나타내어 실리카 에어로겔은 차세대 고집적 소자에서 요구되는 유전 특성을 만족시킴을 알 수 있었다. 누설 전류는 초기 저전압 영역의 ohmic 전도 기구와 고전압 영역의 Poole-Frenkel 기구로 설명되어질 수 있었고 450 °C의 열처리를 통해 개선되어졌다. 0.8 μm

선폭의 trench 구조에서 실리카 에어로겔은 좋은 평탄화 특성을 나타내었고 SiO₂ 에어로겔의 에칭은 기존의 산화 SiO₂의 연장선상에서 고려되어질 수 있음을 또한 알 수 있었다. 그러나 실리카 에어로겔은 제조 후에 표면화합종으로 Si-OH 및 Si-OR 결합이 잔존하게 되며 이는 수분 흡착 및 유전 특성의 저하를 가져오게 되므로 물성 변화 없이 이러한 표면화합종을 제어할 수 있는 기술이 개발되어야 하며 다공 특성으로부터 기인될 수 있는 기계적 특성의 저하도 고려되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. S. K. Chiang and C. Lassen, *Solid State Technology*, October, 33 (1999).
2. L. Peters, *Semiconductor International*, September, 64 (1998).
3. C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-Gel Science*, Academic Press, San Diego, (1990).
4. L. W. Hrubesh, L. E. Keene and V. R. Latorre, *J. Mater. Res.*, 8 1736 (1993).
5. S. S. Prakash, C. J. Brinker and A. J. Hurd, *J. Non-Cryst. Solids*, 190 264 (1995).
6. L. Kocon, F. Despetis and J. Phalippou, *J. Non-Cryst. Solids*, 225 96 (1998).
7. M. H. Jo and H. H. Park, *App. Phys. Lett.*, 72 1391 (1998).
8. S. J. Wang and H. H. Park, *J. Kor. Phys. Soc.*, 33 135 (1998).



정상배

- 1999년 연세대학교 세라믹공학과 학사
- 2001년 연세대학교 세라믹공학과 석사
- 2001년 현재 연세대학교 세라믹공학과 박사과정



박형호

- 1981년 한양대학교 금속공학 공학사
- 1984년 한국과학기술원 재료공학 공학 석사
- 1988년 Univ. de Bordeaux 재료과학 공학박사
- 1988-1989년 (불) 보르도 국립과학연구소 Post-Doc.
- 1989-1995년 한국전자통신연구소 선임 연구원
- 1995-1997년 연세대학교 세라믹공학과 조교수
- 1997-현재 연세대학교 세라믹공학과 부 교수