

## 초고집적소자의 층간절연막용 polysilazane계 spin on glass (SOG)에 관한 연구

나사균 · 정석철\* · 이재관\* · 김진우\* · 홍정의\* · 이원준\*

대전산업대학교 재료공학과 반도체 기술연구소, \*현대반도체 연구소  
(1999년 12월 20일)

### A study on the spin on glass (SOG) from polysilazane resin for the premetal dielectric (PMD) layer of sub-quarter micron devices

Sa-Kyun Rha, Seog Chul Chung,\* Jae Kwan Lee,\* Jin Woo Kim,\*  
Jeong Eui Hong,\* and Won-Jun Lee\*

Department of Materials Engineering Institute of Semiconductor Technology,  
Taejon National University of Technology

\*Research Center, Hyundai Microelectronics

(Received December 20, 1999)

**요약** - 초고집적소자의 층간절연막으로서의 polysilazane계 spin on glass (SOG)의 적용 가능성을 평가하였다. 상용화된 무기 SOG 계열의 polysilazane과 polysilazane에 산화제를 첨가하여 SiO<sub>2</sub>로의 변환 능력을 향상시킨 물질을 spin coating하고 curing하여 SOG 막을 제조한 다음, 400°C에서 900°C까지의 온도범위에서 열처리하면서 SOG 막의 특성을 조사하여 산화제 및 열처리 온도의 효과를 조사하였고, line and space pattern에 SOG 막을 형성하여 gapfill 특성을 비교하였으며, SOG 막에 contact hole을 형성한 다음 습식 세정에 대한 저항성을 평가하였다. 산화제를 첨가함으로써 polysilazane polymer 구조에서 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 더욱 효과적으로 이루어져, 기존 SOG 막에 비해 밀도 및 습식세정 chemical에 대한 저항성이 우수하고 gapfill 특성은 동등한 수준인 SOG 막을 제조할 수 있었다. 특히, 기존의 SOG 막의 경우 좁은 gap space 내에서 curing이 충분하게 일어나지 않아 습식 세정시 hole profile이 나빠지는 문제를 산화제 첨가를 통해 해결할 수 있었다.

**Abstract** - We have investigated the feasibility of spin on glass (SOG) film from polysilazane-type resin as a pre-metal dielectric (PMD) layer of the next-generation ultra-large scale integrated (ULSI) devices. A commercial polysilazane resin and a polysilazane-type resin with oxidizing agent were spin-coated and cured to form SOG films. In order to study the effect of oxidizing agent and annealing, the SOG films were characterized as cured and after annealing at 400°C to 900°C. The density and the resistance against wet chemical of the SOG films were improved by the addition of oxidizing agent, because oxidizing agent enhanced the conversion from polysilazane polymer to SiO<sub>2</sub>. The hole profile issue associated with insufficient curing of polysilazane in narrow gaps was also resolved by oxidizing agent, while the gapfill capability of SOG was not deteriorated by oxidizing agent.

## 1. 서 론

반도체 소자가 고집적화 됨에 따라 소자제조에 필요한 공정기술도 다양화되고 있다. 특히, 배선간의 절연에 필요한 절연막의 경우, 기존에 사용되던 화학증착법(CVD, chemical vapor deposition)에 의한 산화막의 특성이 한계에 다달음에 따라 새로운 절연막 재료와 공정기술이 개발되어 소자제조에 도입되고 있다 [1, 2]. 이

러한 절연막은 그 기능의 면에서 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 금속배선 사이의 절연을 위한 IMD (inter-metal dielectric)층이고, 또 다른 하나는 transistor나 capacitor 간의 절연을 위한 PMD(pre-metal dielectric) 층이다. IMD 층의 경우에는 금속배선 사이의 기생 유전용량 증가로 인한 신호지연(RC delay)나 cross-talk 문제를 해결하기 위한 저유전율 특성, 배선평탄 특성의 저하를 방지하기 위한 저온 형성 및 평탄화 특성

이 요구되고 있으며 [1], PMD 층의 경우에는 소자의 고집적화에 따라 0.05 μm까지 좁아진 높은 단차의 gap space에 절연막을 conformal하게 형성하기 위한 우수한 gapfill 특성, transistor에 인접한 층으로서 dopant 들의 재배열이나 gate 산화막의 특성저하를 방지하기 위한 열적 안정성 및 저온 형성공정, 그리고 평탄화 특성이 요구되고 있다 [3-5].

현재 PMD 층으로는 유동성에 의한 gapfill이 가능한 CVD BPSG(borophosphosilicate glass) 막 [6-8]과 증착과 식각이 동시에 일어나는 원리에 의해 gapfill이 가능한 HDP(high density plasma) CVD oxide막 [2-4] 등이 널리 사용되고 있다. BPSG의 경우에는 증착 후 flowing을 위해 850°C 이상의 고온에서 후속열처리가 필요하며 확산속도가 빠른 boron을 다량 함유하고 있으므로 소자 특성의 저하가 문제가 되고 있으며, gapfill 특성 역시 그 한계에 다다르고 있는 실정이다. HDP CVD oxide의 경우에는 역시 gapfill 특성이 문제가 되고 있으며 평탄화를 위해 막 형성 이후에 CMP(chemical mechanical polishing)와 같은 복잡한 후속공정이 필요한 것이 단점이다. SOG(spin on glass) 공정은 유체의 유동성 및 계면 장력을 이용하여 평탄화를 이루므로 표면단차가 큰 경우에도 우수한 gapfill 특성을 가질 뿐만 아니라 후속 열처리 온도 역시 약 400°C 내외로 BPSG 등에 비해 월등히 낮아 열처리에 의한 문제를 유발하지 않는 장점이 있어 최소 선폭 0.15 μm 이하의 차세대 고집적 소자의 PMD층 공정으로 매우 유망하다 [3]. 그러나, 일반적으로 SOG 막은 밀도가 일반 CVD 산화막에 비해 크게 낮아 습식 식각 속도가 매우 높은 단점이 있고, gap space가 좁아질수록 gap 내부지역에서 SOG 막의 curing이 어려운 것이 문제점으로 대두되고 있다. 특히, 좁은 gap 내부에서는 gap 하부로 내려갈수록 SOG 막의 curing이 충분히 일어나지 않아 막의 밀도가 낮아지며, 이에 따라 습식 세정 chemical에 대한 저항성 역시 나빠진다. 이와 같은 현상은 contact hole을 형성한 다음 후속 공정을 진행하기 위한 습식 세정을 실시할 때, hole의 단면이 항아리 모양으로 되어 후속공정을 어렵게 하거나, 더욱 심해지면 주변의 hole과 연결되어 소자특성에 심각한 문제를 야기시킬 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 열처리 및 산화제 첨가를 통해 SOG 막의 curing 특성을 향상시키고자 하였다. 이를 위해, 상용화된 무기 SOG

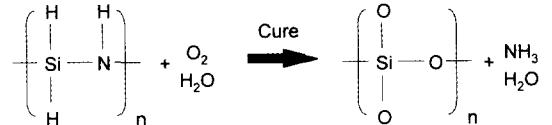


그림 1. Curing mechanism of SOG film from polysilazane polymer.

계열의 polysilazane(이하 chemical 1)과 polysilazane에 산화제를 첨가하여 SiO<sub>2</sub>로의 변환 능력을 향상시킨 물질(이하 chemical 2)을 spin coating하고 curing하여 SOG 막을 제조한 다음, 400°C에서 900°C까지의 온도 범위에서 열처리하면서 SOG 막의 특성을 조사하여 산화제 및 열처리 온도의 효과를 고찰하였다. 본 연구에 사용된 polysilazane의 구조 및 curing mechanism을 그림 1에 나타내었다. 박막의 특성으로는 blanket film 상태에서 refractive index, volume shrinkage, wet etch rate, nitrogen 함량 등을 조사하였다. 또한, 0.05 μm space를 갖는 line & space pattern에 chemical 1과 2를 이용한 SOG 공정을 각각 적용하여 gapfill 특성을 비교하고, SOG 막에 contact hole을 형성한 다음 습식 세정에 대한 저항성을 평가하여, 최종적으로 차세대 소자의 PMD 공정에서의 SOG 공정 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

먼저, 8인치 p-type Si <100> wafer 위에 TOK사의 SOG 장비(TS 8162FD)를 사용하여 polysilazane (chemical 1)과 산화제를 첨가한 polysilazane (chemical 2)를 spin coating하고 curing하여 각각 SOG 막 I과 II를 형성하였다. Spin coating시 회전속도는 2700 rpm로 하였고, soft bake는 hot plate를 이용하여 N<sub>2</sub> 분위기 30°C, 90°C, 225°C에서 각각 3분간 실시하였으며, hard bake는 furnace를 이용하여 steam 분위기, 온도 400°C에서 90분간 실시하여 두께 300 nm±5%의 SOG 막을 형성하였다. 이 때 O<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 유량은 각각 10 slm과 0.1 sccm이었다. 이렇게 준비된 SOG 막은 후속열처리에 따른 특성 변화를 조사하기 위하여 여러 가지 조건에서 열처리되었는데, furnace 방식으로는 600°C와 700°C에서 60분간 열처리되었고 RTP 방식으로는 이에 상응하는 조건인 800 °C와 900°C에서 1분간 각각 열처리되었다. 열처리 분위기 기체로는 O<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>가 사용되었다.

열처리 및 산화제 유무에 따른 SOG 막 특성의 변화를 조사하기 위하여 SOG 막을 증착 직후와 열처리 후에 여러 가지 방법으로 분석하였다. SOG 막의 SiO<sub>2</sub>로의 변환 정도를 조사하기 위해 FTIR(Fourier transform infrared spectroscopy)를 사용하였고, ellipsometer를 이용하여 막의 두께 및 굴절율(refractive index)을 측정하여 volume shrinkage 및 density 변화를 조사하였다. 또한 SIMS(secondary ion mass spectroscopy)를 사용하여 SOG 막의 성분을 분석하였으며, 99:1 HF(deionized water : HF = 99:1)와 500:1 HF (deionized water : HF = 500:1)를 사용하여 습식 식각 속도를 조사하였다. 한편, 0.05 μm space를 가진 line과 space로 이루어진 pattern을 Si wafer 위에 형성한 다음, chemical I과 chemical II를 사용한 SOG막 I, II를 형성하고 단면 SEM 촬영을 통해 각각의 gapfill 특성을 조사하였다. 습식 세정 chemical 저항성을 평가하기 위하여 gapfill 특성을 평가한 시편에 photolithography 및 reactive ion etching(RIE) 공정을 이용하여 0.20 μm 크기의 hole을 0.15 μm의 간격을 두고 형성한 다음 99:1 HF 1분간 습식 세정을 실시한 후 단면 SEM 촬영을 통해 hole profile의 이상 유무를 확인하였다.

### 3. 결과 및 토의

Chemical I과 chemical 2를 사용하여 형성한 SOG 막 I, II에 대해서 열처리에 따른 FTIR spectrum 변화를 그림 2에 각각 나타내었다. Polysilazane의 SOG 막의 경우 steam curing 후의 SiO<sub>2</sub>로의 변환 정도는 일반 SiO<sub>2</sub>의 FTIR상의 주요 peak인 1080 cm<sup>-1</sup> (Si-O symmetric stretching mode), 820 cm<sup>-1</sup> (Si-O symmetric bending mode), 457 cm<sup>-1</sup> (Si-O symmetric rocking mode)의 발달 정도로 평가할 수 있다. Fig. 2에서와 같이 SOG 막 I의 경우는 점원으로 표시한 지역처럼 steam curing 후 뿐만 아니라 O<sub>2</sub> 분위기에서 800°C 1분간 열처리한 경우에도 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 충분히 진행되지 않아 Si-O bond가 발달하지 않은 반면에, 산화제를 첨가한 SOG 막 II의 경우에는 steam curing 만으로도 일반 Si-O bond peak이 관찰됨으로 보아 기존의 SOG 막 I에 비해 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 충분히 진행되었음을 알 수 있다. 이는 산화제의 첨가가 SiO<sub>2</sub>로의 변환을 보다 용이하게 한 것으로 설명될 수 있을 것이

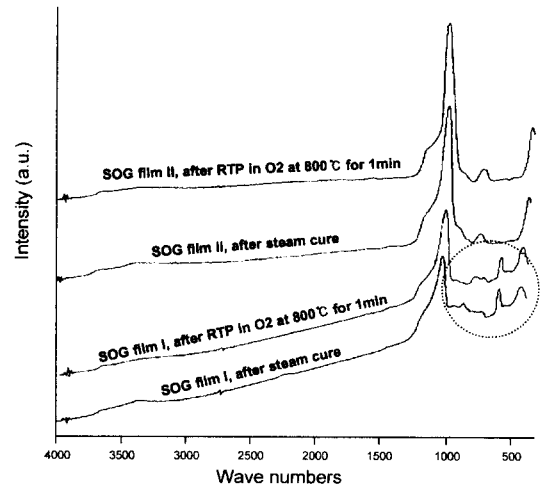


그림 2. FTIR spectrum of SOG films.

다. 또한, SOG 막 II의 경우 steam curing 후 O<sub>2</sub> 분위기에서 800°C 1분간 진행한 시편에서도 Si-O bond가 충분히 발달하였으며, polysilazane의 주성분인 Si-N, N-H, 및 Si-H bond peak은 관찰되지 않았다. 이상의 FTIR 결과로 볼 때 SOG 막 II는 후속 열처리는 물론 steam curing 만으로도 SiO<sub>2</sub>-like 물질로 충분히 변환되었다고 판단된다.

SOG 막 I, II의 각각에 대해서 후속열처리에 따른 volume shrinkage를 조사하여 그림 3에 나타내었다. SOG 막 I은 열처리 온도가 증가됨에 따라 큰 volume shrinkage를 보이고 있는데, 이는 동일한 steam curing

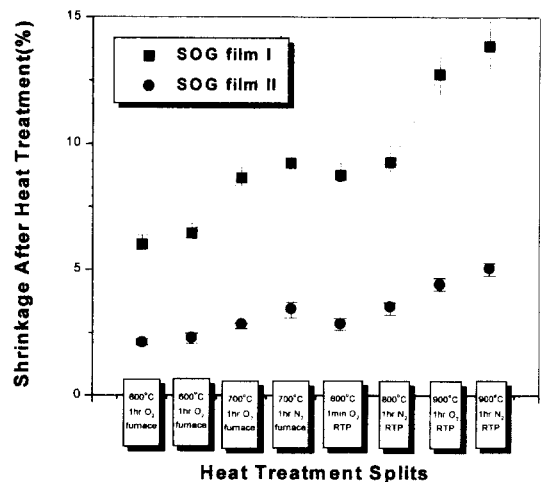


그림 3. Shrinkage of SOG film after heat treatment.

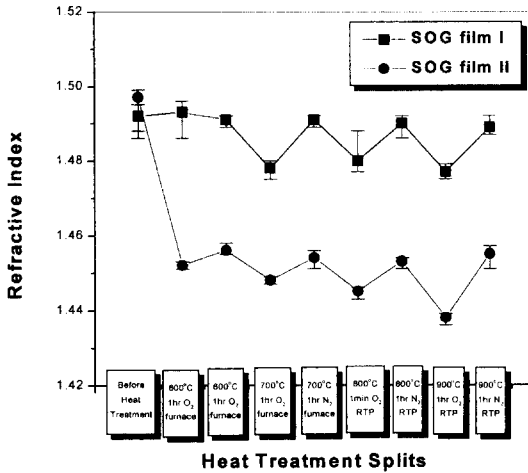


그림 4. Refractive index of SOG film after heat treatment.

후에 상대적으로 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 덜 이루어진 상태에서 후속 열처리 중에 SiO<sub>2</sub> 변환 현상이나 막 내부에 잔존하고 있는 nitrogen의 out-diffusion 현상이 계속 진행되었기 때문에 판단된다. Chemical 2로 형성한 SOG 막 II의 경우에는 SOG 막 I의 경우와는 달리 본 실험에서 행한 최고 열처리 온도인 900°C, N<sub>2</sub> 분위기에서 1분간 RTP 열처리한 후에도 5.08% 밖에 shrinkage가 일어나지 않은 것으로 보아 SOG 막 형성에서 실시한 400°C steam 분위기에서 1시간 동안 실시한 curing에서 이미 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 효과적으로 일어나 치밀화가 거의 이뤄졌다고 판단된다.

그림 4에 SOG 막 I, II의 각각에 대해서 후속열처리에 따른 굴절율 변화를 나타내었다. SOG 막 I의 경우에는 열처리 전후에 큰 변화 없이 1.480에서 1.496 정도의 값을 보였으며, SOG 막 II의 경우에는 steam curing 후 1.499 정도의 값을 보이고 열처리 후에는 조건에 따라 다소 차이는 있으나 대략 1.439에서 1.458의 범위를 갖고 변화하였다. 절연막의 굴절율 값이 막의 stoichiometry, 밀도 및 불순물의 농도에 영향을 받는 점을 고려해보면, SOG 막 I은 열처리후의 높은 shrinkage에도 불구하고 굴절율의 큰 변화가 없는 것으로 보아 상당량의 Si-N bond가 잔류하고 있음을 의미한다. 즉 변환되지 않은 polysilazane의 network이 상당량 열처리 후에도 남아 있다고 생각된다. 반면 SOG 막 II의 경우, 낮은 shrinkage에도 불구하고 굴절율의 변화가 크며 1.45대의 oxide 굴절율 값을 나타내고 있다. 따라서 상대적으로 polysilazane network 및

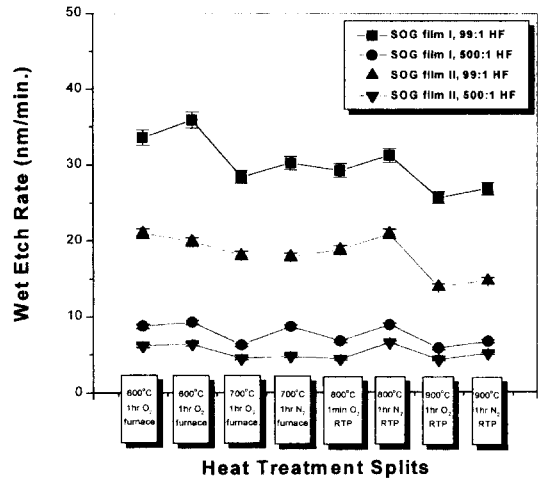


그림 5. Removal rate of SOG film in dilute HF solution after heat treatment.

solvent 잔류물과 같은 불순물의 농도 변화가 큼을 알 수 있으며 이는 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 충분히 진행되었기 때문에 판단된다.

SOG 막의 chemical 저항성에 대해서 평가하기 위해 99:1 HF와 500:1 HF를 사용하여 습식 식각 속도를 조사하여 Fig. 5에 나타내었다. HF의 농도가 증가함에 따라 습식 식각 속도가 증가하였다. 밀도와 습식 식각 속도를 관련 지어 생각해 볼 때 SOG막 II는 후속 열처리 조건과 무관하게 대략 비슷한 밀도의 물질로 변화했다고 판단되며, 이는 서로 비슷한 굴절율 값을 보인 그림 4의 결과와 일치하는 결과이다. 비교적 HF의 농도가 낮은 500:1 HF에 대한 습식 식각 속도 평가에서는 SOG 막 I, II의 wet etch rate가 그다지 크지 않은 차이를 보였으나, 비교적 HF 농도가 높은 99:1 HF에 대한 습식 식각 속도 평가에서는 SiO<sub>2</sub>로의 변환 및 치밀화가 보다 진척된 SOG 막 II가 SOG 막 I에 비해서 낮은 습식 식각 속도를 보였다.

또한, 열처리에 따른 SOG 막의 nitrogen 농도를 SIMS로 조사한 결과 역시 Fig. 2의 FTIR 결과와 잘 일치하였는데, 이를 Fig. 6에 나타내었다. Chemical I으로 형성한 SOG 막 I의 경우에는 nitrogen 농도가 막 형성 직후  $1.53 \times 10^{21}$  atoms/cm<sup>3</sup>인데 반해 chemical II로 형성한 SOG 막 II의 경우에는 동일한 조건에서  $4.02 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>로 나타나 SOG 막 II의 SiO<sub>2</sub>로의 변환 정도가 월등히 높음을 알 수 있다. 또한, SOG 막 I의 nitrogen 농도는 RTP로 900°C 1

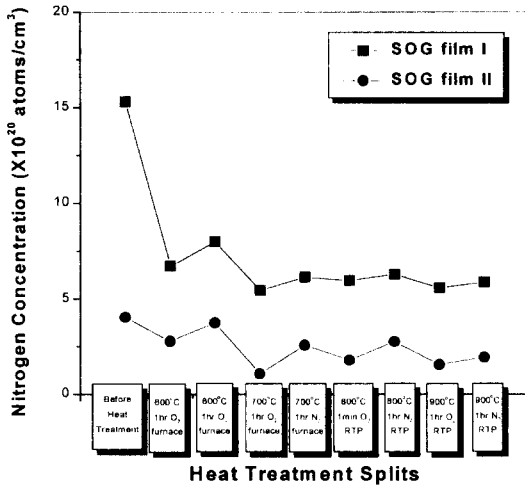


그림 6. Nitrogen concentration in SOG film after heat treatment.

분간 N<sub>2</sub> 분위기에서 열처리한 후에  $5.89 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>으로 현저하게 줄어들었으나, SOG 막 II의 경우에는 동일한 조건에서  $1.92 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>으로 열처리 전과 큰 차이를 보이지 않아 SOG 막 형성 시 이미 SiO<sub>2</sub>로의 변환이나 막 내부에 잔존하고 있는 nitrogen의 out-diffusion이 대부분 일어났음을 확인할 수 있었다. 한편, SOG 막 I, II 모두 N<sub>2</sub> 분위기에서 열처리한 경우보다 O<sub>2</sub> 분위기에서 열처리한 경우가 nitrogen 농도가 낮게 나타났는데, 이는 그림 1에서 볼 수 있듯이 O<sub>2</sub> 분위기가 polysilazane의 산화에 유리하기 때문으로 판단된다.

SOG 막의 차세대 소자 ILD 층으로의 적용 가능성을 평가하기 위해 gapfill 특성을 비교 평가하였다. 그림 7은 0.05 μm space를 가진 line과 space로 이루어진 pattern을 형성한 Si wafer 위에 SOG 막 I, II를 각각 형성한 다음 촬영한 단면 SEM 사진이다. 그림 7의 (a), (b)에서 볼 수 있듯이 SOG film I, II의 경우는 모두 0.05 μm space를 void 없이 완벽하게 gapfill하였다. 일반적으로 알려진 바와 같이 SOG 막의 coating 시 유체의 유동성 및 계면 장력을 이용하여 평탄화가 이루어지므로 CVD에 의해 제조된 BPSG 막에 비해 SOG 막이 우수한 gapfill 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

SOG 막은 blank wafer에서의 박막 특성과 pattern wafer에서의 특성이 다소 차이가 나는데, 특히 step pattern에서는 spin coating시 bottom corner 부분에서

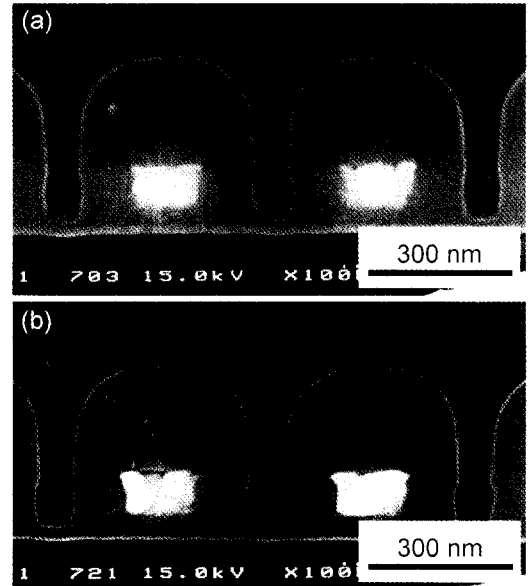


그림 7. Cross-sectional SEM photographs of (a) SOG film I and (b) SOG film II deposited on narrow gaps.

외류가 발생하여 porous하게 coating되기 쉬우며, gap space가 좁아질수록 hole 내부 지역의 SOG 막의 curing이 균일하게 일어나지 않아 깊이에 따라 밀도차가 발생하기도 한다. 이러한 SOG 막의 불균일한 밀도는 chemical 저항성을 불균일하게 하여 SOG 막을 실제 소자 제조에 적용하기 어렵게 하고 있다. 즉, SOG 막의 불균일한 curing 때문에 contact hole 형성 후 습식 세정을 실시할 때 hole profile이 항아리 모양으로 되는 경우에는 후속 공정인 poly-Si plug 형성 공정이 void나 key hole의 형성을 피하기 어려워져 소자의 특성 및 신뢰성에 악영향을 미친다. 또한, 이와 같은 현상이 심해지면 hole과 hole이 연결되어, contact 끼리 전기적으로 연결되는 효과를 나타내, 소자의 오동작 및 수율 감소의 원인이 되는 등 큰 문제점을 야기시킨다. 따라서, SOG 막의 균일한 curing 및 습식 세정에 대한 저항성 확보는 process integration 측면에서 매우 중요하다. 이를 평가하기 위해 gapfill 특성을 평가한 각각의 sample에 0.20 μm 크기의 hole을 0.15 μm의 간격을 두고 형성한 다음 500:1 HF 1분간 습식 세정을 실시한 후 단면을 SEM으로 관찰하였는데, 촬영한 단면 SEM 사진을 그림 8에 나타내었고, 그림 9의 (a)에 표시한 것과 같이 per-side dipping thickness를 측정하여 그림 9의 (b)로 나타내었다. Chemical 1을

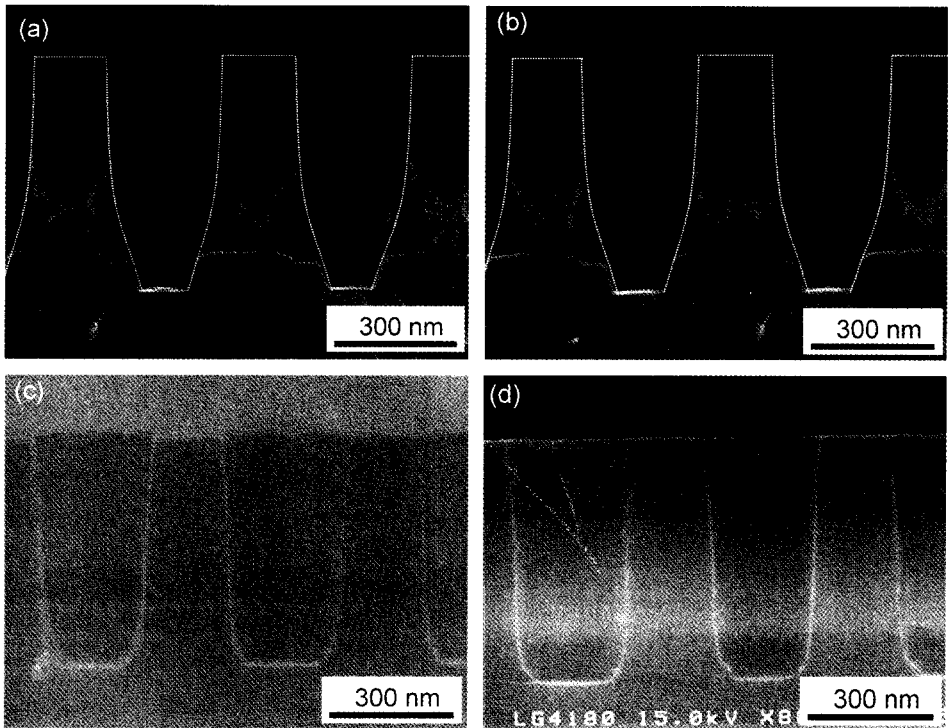


그림 8. Cross-sectional SEM photographs of contact hole after wet clean using 500:1 HF: (a) SOG film I, RTP at 800°C in O<sub>2</sub> for 1 min; (b) SOG film I, RTP at 900°C in O<sub>2</sub> for 1 min; (c) SOG film II, RTP at 800°C in O<sub>2</sub> for 1 min; (d) SOG film II, RTP at 900°C in O<sub>2</sub> for 1 min.

사용하여 형성한 SOG 막 I의 경우 800°C, O<sub>2</sub> 분위기에서 RTP에서 후속 열처리한 경우에도 Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 hole 아래쪽의 SOG 막이 쉽게

dipping 되어 hole과 hole이 분리되지 못하고 연결되는 현상을 보였고, 본 실험에서 행한 최대 열처리 조건인 900°C O<sub>2</sub> 분위기에서 1분간 RTP 열처리한 경우인 그

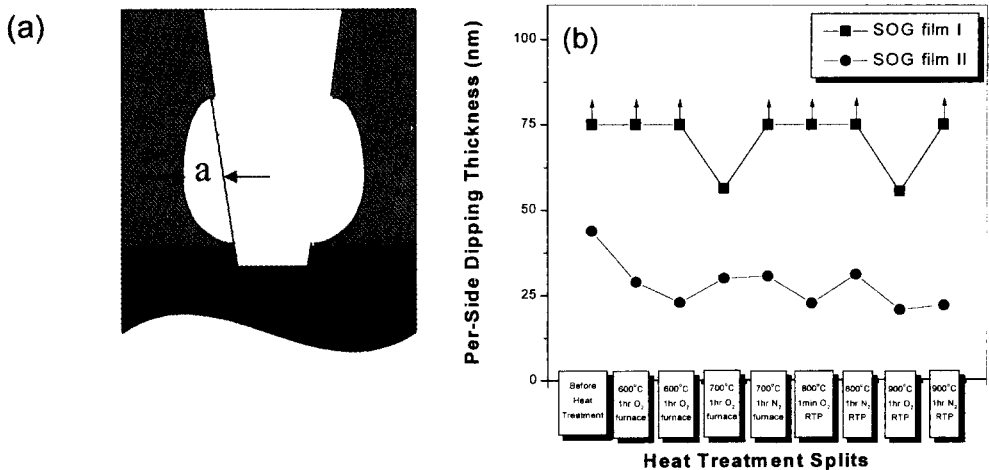


그림 9. (a) Schematic of per-side dipping thickness, (b) per-side dipping thickness of SOG film determined from cross-sectional SEM photographs.

림 8(b)에서도 hole이 형성된 아래 부분 SOG 막의 치밀화가 충분히 일어나지 않아 hole 아래지역에 향아리 모양이 형성되어 hole 불량을 유발하였다. 이는 bulk film의 습식 식각 속도에서 두 SOG가 500:1 HF에 대해 비슷한 값을 가지는 것과는 매우 차이가 있는 결과이다. 반면에 chemical 2를 사용하여 형성한 SOG 막 II을 적용한 sample의 경우에는 800°C, O<sub>2</sub> 분위기에서 RTP로 열처리하거나(그림 8(c)) 900°C, O<sub>2</sub> 분위기에서 RTP 열처리했을 때(그림 8(d)) hole 아래 부분까지 치밀화가 충분히 일어나 우수한 hole profile을 보여 주었다. Per-side dipping thickness를 측정하여 나타낸 그림 9(b)에서도 SOG 막 II를 사용한 시편의 경우에는 본 실험에서 행한 모든 후속 열처리 조건에서 per-side dipping thickness가 별다른 변화를 보이지 않았다. SOG 막 I를 적용한 시편의 경우에는 furnace로 700°C 1시간 O<sub>2</sub> 분위기와 RTP로 900°C 1분간 O<sub>2</sub> 분위기에서 열처리한 경우를 제외하고는 모든 시편에서 side dipping이 75 nm 이상 되어 hole 아래 지역의 hole과 hole이 연결되어 per-side dipping thickness를 측정할 수 없었다.

#### 4. 결 론

무기 SOG 계열의 polysilazane resin에 산화제를 첨가함으로써 polymer 구조에서 SiO<sub>2</sub>로의 변환이 더욱 효과적으로 이루어져, SOG 막의 밀도, 습식 세정 chemical에 대한 저항성이 기존 물질보다 우수한 특성을 얻을 수 있었고, gapfill 특성에서는 기존 polysilazane을 사용하여 형성한 SOG 막과 동등한 수준을 보였다. 특히, 기존의 SOG 막의 경우 좁은 gap

space 내에서 curing이 충분하게 일어나지 않아 습식 세정시 hole profile이 나빠지는 문제를 산화제 첨가를 통해 해결할 수 있었다. 또한, 산화제를 첨가해 제조한 SOG 막이 600°C~900°C 후속 열처리 온도 영역에서 안정적인 물성을 얻어 넓은 공정 범위를 가짐을 확인하여, narrow space를 가지는 최소선폭 0.15 μm이하의 초고집적 소자의 저온 평탄화용 ILD oxide 막으로의 적용 가능성이 높다고 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] N. Ohashi, H. Nezu, H. Maruyama, T. Fujiwara, H. Aoki, H. Yamaguchi, and N. Owada, Proceeding of the 2nd Dielectric for ULSI Multilevel Interconnect Conference (DUMIC), 1996, p. 86.
- [2] S. Nag, A. Chatterjee, K. Taylor, I. Ali, S. O'Brien, S. Aur, J. D. Luttermer, and I.-C. Chen, Technical Digest of 1996 International Electron Devices Meeting (IEDM), 1996, p. 841.
- [3] M. Yoshida, T. Kumauchi, K. Kawakita, N. Ohashi, H. Enimoto, T. Umezawa, N. Yamaoto, I. Asano, and Y. Tadaki, Technical Digest of 1997 IEDM, 1997, p. 41.
- [4] S. Nag, R. Ramamurthy, W. J. Lei, C. Monteil, M. Hickey, Solid State Technology **41**(9), 69 (1998).
- [5] J. Bevk, G. E. Georgiou, M. Frei, P. J. Silverman, E. J. Lloyd, Y. Kim, H. Luftman, M. Furtch, T. Schiml, and S. J. Hillenius, Technical Digest of 1995 IEDM, 1995, p. 893.
- [6] K. Fujino, Y. Nishimoto, N. Tokumasu, and K. Maeda, J. Electrochem. Soc. **138**(2), 550 (1991).
- [7] K. Fujino, Y. Nishimoto, N. Tokumasu, and K. Maeda, J. Electrochem. Soc. **138**(10), 3019 (1991).
- [8] V. Y. Vassiliev, J.-Z. Zheng, M. Liao, and Y. S. Lin, Proceedings of the 4th DUMIC, 1998, p. 90.