

BTMSM/O₂ 유량변화에 따른 SiOCH 박막의 유전상수 특성

Properties of SiOCH Thin Film Dielectric Constant by BTMSM/O₂ Flow Rates

김종욱^{1,a}, 황창수², 김홍배³
(Jong-Wook Kim^{1,a}, Chang-Su Hwang², and Hong-Bae Kim³)

Abstract

We have Manufactured the low-k dielectric interlayer fabricated by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The thin film of SiOCH is studied correlation between components and Dielectric constant. The precursor was evaporated and introduced with the flow rates from 16 sccm to 25 sccm by 1sccm step in the constant flow rate of 60 sccm O₂ in process chamber. The chemical characteristics of SiOCH were analyzed by measuring FT/IR absorption lines and obtained each dielectric constant measuring C-V. Then compare respectively. ILD of BTMSM/O₂ could have low dielectric constant about $k \sim 2$, and react sensitively. Also dielectric constant could be decreased by the effects of decreasing CH₃ and growing Si-O-Si(C) after annealing process.

Key Words : Low-k, SiOCH film, BTMSM precursor, PECVD, FTIR, 2D-correlation analysis, C-V characteristics

1. 서론

반도체 소자의 집적도가 초대규모로 증가함에 따라 집적회로를 구성하는 단위 transistor들 사이의 interconnection 간격은 더욱 조밀하고 복잡해지는 추세이다. 고밀도로 집적하기 위해 단위 chip의 크기, 단면적 및 chip 사이의 연결 간격 등을 극단적으로 감소시키고 이들을 packing 하는 방향으로 발전되기 때문에 Logic chip의 기능은 transistor의 구성요소들 간의 특성뿐만 아니라 소자간의 interconnection에서 발생하는 gate length의 감소와 switching time 증가로 영향을 받게 된다[1,2,3]. 다층구조로 인한 배선 사이의 간격 감소로 발생하는 배선 사이의 기생 정전용량 C의 증가와 신호잡음발생 및 신호전달시간 지연 등을 억제하기 위하여 보다 낮은 유전상수를 갖는 층간 절연막 유전

체(ILD: Interlayer Dielectric)로 대체하는 것이 필요하다[4]. 차세대 저유전율 물질로 각광을 받고 있는 층간 절연 물질은 기존의 TEOS-SiO₂에 다량의 탄소가 함유된 하이브리드 타입 (hybrid-type)의 SiOCH 박막이다. SiOCH 박막은 산업화에 가장 성공적인 것으로 평가 받는 물질로서, Si-C 결합 (Si-CH₃ 형태)의 낮은 이온 분극성 (ionic polarizability)과 기공형성 및 망상구조로 인한 박막 밀도 감소로 저유전상수를 갖게 되는 물질이다 [5,6]. 최근 연구 보고에 의하면 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 방법으로 증착된 SiOCH 박막에서 메틸기(-CH₃)의 양이 감소하면 Si-CH₃ 결합이 친핵성 공격을 받고 CH 결합이 산소에 의해 늘어지는 효과가 나타난다. 이러한 효과는 절연막으로서 유전상수가 낮은 비정질 구조 형성이 가능하며, SiOCH는 박막 내에 기공형성을 억제하면서 망상구조 형성으로 인한 자유공간 증가 및 박막밀도 감소로 낮은 유전상수 획득이 가능하기 때문에 SOC 방식보다 안정하다는 장점이 있다[7,8].

본 연구에서는 Capacitive Coupled Plasma (CCP) 방식의 PECVD 증착 방법을 이용하여 Bis-trimethylsilylmethane(BTMSM) 전구체와 O₂

1. 청주대학교 전자공학과
(충북 청주시 상당구 내덕2동)
2. 공군사관학교 물리학과
3. 청주대학교 전자정보공학부
a. Corresponding Author : kimses206@hanmail.net
접수일자 : 2008. 2. 27
1차 심사 : 2008. 3. 12
심사완료 : 2008. 3. 22

가스의 유량변화율에 따른 SiOCH 박막 형성기구와 관련하여 CH₃ 및 Si-O-Si(C) 등의 복잡한 결합구조들을 통하여 낮은 유전을 형성 기구에 대하여 연구하였다.

2. 실험

본 연구에서는 PECVD 방법을 이용하여 BTMSM/O₂ 전구체를 해리하여 직경이 6인치인 p-type (100) Si 기판에 하이브리드 타입 (hybrid-type)의 SiOCH 박막을 증착하였다. 증착에 사용된 전구체 BTMSM을 상온에서 액체 상태로 bubbler에 담은 후 실리콘 bath속에서 30 °C로 일정한 온도를 유지하였다. 아르곤(Ar) 가스를 이송가스로 사용하여 BTMSM전구체를 반응 챔버로 이동시켰으며 이송 중 재응축을 방지하기 위하여 가스 전송라인을 30 °C로 일정하게 유지하였다. 반응가스로 산소 (O₂) 가스를 BTMSM 전구체와 혼합하여 PECVD 방식에 의하여 해리된 후 SiOC 박막이 p-type (100) Si 기판에 증착되도록 하였다.

전구체의 해리 및 증착 결과를 BTMSM/O₂ 세분화된 유량비에 따라 관찰하기 위하여 반응 챔버의 작업 진공도는 3 Torr로 설정하고, 반응가스로 사용된 산소(O₂) 가스를 60 sccm으로 일정하게 유지한 상태에서 유량 제어장치 (MFC : mass flow controller)를 이용하여 BTMSM 전구체의 유량을 16 sccm ~ 25 sccm까지 1 sccm씩 차등을 두면서 유량비를 조절하였다. 반응 챔버에 도달한 BTMSM/O₂ 가스를 해리하기 위하여 13.56 MHz의 RF전력 450 Watt로 플라즈마를 발생하고 샤워 헤드 (shower head)와 기판과의 거리는 500 mils로 설정하여 Capacitive Coupled Plasma (CCP)-PECVD 방식으로 증착하였다. BTMSM/O₂ 유량비로 증착된 SiOC 박막을 450 °C 온도로 30분 동안 진공 상태에서 열처리를 실시한 후 유전상수의 변화를 관찰하였다.

전구체 유량비에 따른 SiOCH 박막 시편의 구성성분의 변화를 분석하기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광기 (FTIR : Fourier Transform Infrared spectroscopy)를 이용하였고, 전자분극에 의한 유전상수 기여와 증착된 박막의 두께를 측정하기 위하여 Ellipsometer (UNISEL/M200, HORIBA)의 632.8 nm 광원 파장을 SiOC 박막에 조사시켜 굴절률을 측정하였다. 높은 switching time 영역에서 SiOCH 박막의 유전상수를 측정하기 위해 Aluminum - SiOCH-Si 형태의 MIS (metal-insulator-semiconductor) 구조의 커패시터를 제작

하고 HP4284A 1 MHz LCR meter를 이용하여 -40 V ~ 10 V 사이의 역방향 및 순방향 인가전압에 대한 정전용량-전압 (C-V) 특성곡선을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

FTIR 흡수 스펙트럼을 통해 SiCOH 박막의 결합구성성분을 분석하였다. 그림 1은 상온에서 BTMSM 유량을 16 sccm에서부터 1 sccm 씩 증가하면서 25 sccm까지 변화하면서 획득한 데이터로 500 cm⁻¹부터 4000 cm⁻¹의 영역에서의 FTIR 흡수 스펙트럼이다.

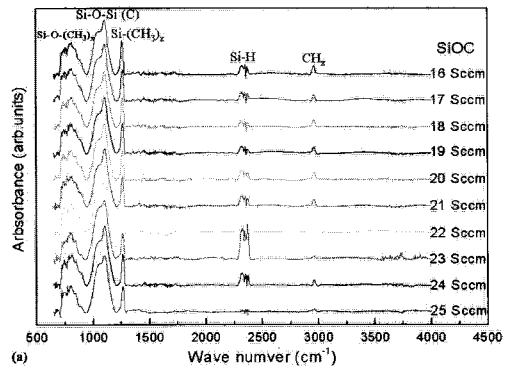


그림 1. 500 cm⁻¹ ~ 4000 cm⁻¹ 파수 범위의 FTIR 스펙트럼.

Fig. 1. FTIR spectras in the wave number range from 500 cm⁻¹ to 4000 cm⁻¹ : As-deposited films.

BTMSM 해리 후 메틸기-(CH₃)_x 및 탄소 등과 결합된 구조를 갖는 Si-O-(CH₃)_x 와 Si-O-Si(C) 그룹이 상대적으로 낮은 파수영역에서 다수의 peak들이 700-950 cm⁻¹에서 중첩되어 있고, 1260 cm⁻¹에서 메틸기가 산소와 반응 없이 Si 시편에 직접 결합한 Si-(CH₃)_x 대칭그룹을 볼 수 있다[9]. Si-O-Si(C) stretching vibration에 의한 결합그룹이 950-1200 cm⁻¹에서 나타났으며, Si-O그룹의 이온성 특성에 의하여 C-O 그룹 보다 상대적으로 강한 세기를 보이고 있다. Si-H stretching vibration mode에 의한 흡수밴드가 2280-2400 cm⁻¹에서 확인되며, CH_x(x=1,2,3) 결합그룹은 2950 cm⁻¹에서 약한 흡수밴드를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 단, 유기물 타입으로 알려진 3500~4000 cm⁻¹ 근처 영역에서의 OH 결합 모드와 관련된 피크는 뚜렷이 나타나지 않았다.

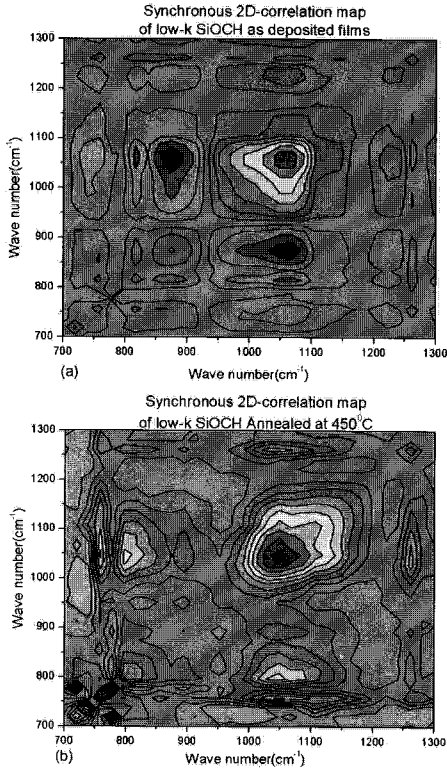


그림 2. low-k SiOCH 유전체의 FTIR 흡수선에 대한 700 cm⁻¹ ~ 1300 cm⁻¹파수의 a)상온증착 막과 b)열처리 막의 동시적인 상관관계를 나타내는 2차원 상관관계 등고선 지도.
 Fig. 2. Two dimensional correlation contour maps illustrating synchronous correlation of as-deposited films in a) and annealed films in b) from 700 cm⁻¹ ~ 1300 cm⁻¹ wave numbers for FTIR absorptions of low-k SiOCH dielectrics.

그림 2는 전구체의 유량비의 섭동(16 sccm ~ 25 sccm)에 따라 획득된 FTIR 스펙트럼을 이용하여 Si-O-CH₃, Si-O-Si 및 Si-CH₃ 결합그룹 사이의 상호 연관성 및 유량비에 대하여 민감성을 분석하기 위한 2차원 상관관계 그림이다[10-12]. 세 그룹에 대한 상호 연관성과 관련하여 스펙트럼의 범위는 700 cm⁻¹에서 1300 cm⁻¹까지 한정하였으며 I. Noda 가 개발한 2차원 상관관계 분석법을 이용하여 유량변화에 대한 열처리 전 및 후의 동시적인 변화인 Synchronous 그래프를 나타내고 있다 [10]. Si-O-CH₃ 결합구조는 근사적으로 715 cm⁻¹,

758 cm⁻¹, 817 cm⁻¹ 및 875 cm⁻¹로 분해되고 Si-CH₃ 결합그룹은 1262 cm⁻¹의 단일 peak 등으로 나타났으나, Si-O-Si(C) 결합구조는 근사적으로 1050 cm⁻¹, 1100 cm⁻¹ 및 1140 cm⁻¹ 등이 중첩되어 있으며 분명하게 분해되지는 않는다.

열처리 전 그림 2(a)에서 Si-O-Si 결합그룹의 auto-correlation이 열처리 전 1061 cm⁻¹에서 강하게 나타났으나 열처리 후에는 그림 2(b)에서 1049 cm⁻¹에서 강한 autocorrelation 을 보이고 있으므로 메틸기의 이탈 후 Si-O와 재결합에 다른 Si-O-Si(C)의 결합그룹의 성분 변경과 연관성이 있는 것으로 판단된다. 또한 Si-CH₃ 결합그룹에서도 875의 cm⁻¹에 있는 모드 역시 메틸기이탈에 따라 열처리 후 소멸되는 것을 볼 수 있다. 이는 열처리에 의하여 메틸기의 소멸에 따라 Si-O-Si(C) 및 Si-O-CH₃가 안정화됨을 의미한다.

Si-O-Si(C) 결합그룹은 cross link 구조, open link 구조 및 cage link 구조의 중합체로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다[13]. 2차원 상관관계 분석을 통하여 Si-O-Si(C) 결합그룹 내의 모드들간 유량변화에 대하여 변화의 민감성은 cross link (1050 cm⁻¹) → open link(1100 cm⁻¹) → cage link (1140 cm⁻¹) 순으로 정리된다. Si-O-Si(C) 결합그룹 내의 중첩된 결합모드들의 전구체 유량변화에 대한 성장 경향을 분석하기 위하여 유량별 FTIR 스펙트럼들을 각각 Gaussian fitting을 이용하여 Deconvolution하였다.

그림 3(a)와 2(b)는 950 cm⁻¹에서 1200 cm⁻¹까지 BTMSM 전구체의 유량에 따른 주 모드인 Si-O-Si 결합그룹의 진동모드들을 Deconvolution한 FTIR 스펙트럼을 열처리 전은 (a)에, 후는 (b)에 나타내고 있다. Si-O-Si 결합그룹은 Si-O-Si(C) cross link(1050 cm⁻¹) 모드, Si-O-Si(C) open link(1110 cm⁻¹) 모드, 그리고 Si-O-Si(C) cage link(1150 cm⁻¹) 모드들의 중첩으로 분해되며, 이러한 결합모드들의 분포는 박막의 결정구조를 알아내는데 중요한 정보를 제공한다. 그림 3의 Deconvolution 결과에 대해 좀 더 자세히 분석하기 위해 각 모드에 대한 상대적인 중첩비중(면적)의 변화를 각각 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 나타난 결과에서 보면 각 결합모드의 중첩비중은 상대적으로 Si-O-Si(C) cross link구조가 가장 많이 차지하고 있으며, 다음 Si-O-Si(C) open link 구조 및 Si-O-Si(C) cage link 구조 순이다. 그림 4의 (b)에 보인 열처리에 따른 모드별 중첩비중의 변화에서 Si-O-Si(C) cross link 모드는 60 %에서 65 %로 증가하였으며, Si-O-Si(C)

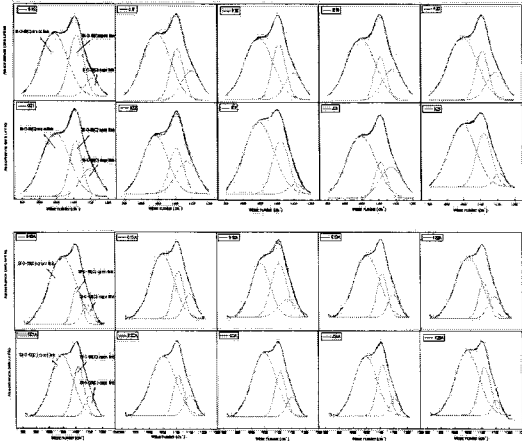


그림 3. 그림1에서 보여진 샘플을 950 cm⁻¹ ~ 1200 cm⁻¹ 파수 범위에서 Si-O-Si(C) 결합의 디컨버루션 스펙트럼.

Fig. 3. Deconvoluted spectrum of Si-O-Si(C) bonding in the wave number range from 950 cm⁻¹ to 1200 cm⁻¹ for the sample shown in Fig. 1. : (a) As-deposited films and (b) Annealed films.

cage link 모드는 18%에서 10% 이하로 감소하는 경향성을 보이나 Si-O-Si(C) open link 모드는 상대적으로 25% 정도로 크게 변화하지는 않았다. 단 18번 시편은(BTMSM/O₂: 18 sccm/60 sccm) 다른 시편과 비교하여 열처리 후 Si-O-Si(C) cross 구조가 감소하고 Si-O-Si(C) cage link 구조가 증가하는 현상을 보였다. 전구체의 유량비가 증가할수록 열처리 후 Si-O-Si(C) cage link 구조는 감소하는 경향성을, Si-O-Si(C) open link는 증가하는 경향성을, 그리고 Si-O-Si(C) cross link는 포화되는 경향성을 보인다. 열처리에 대하여 5% 정도 감소하는 경향성을 보이는 Si-O-Si(C) cage link 구조는 메틸기와 결합되어 있는 것으로 추정된다.

Si-O-Si 결합그룹 내의 모드들의 중첩비중은 BTMSM 유량변화에 따라서 비례적으로 증가하거나 감소하지 않으며, 미세한 유량변화에 따라 박막 증착 시 민감하게 변화되며, 열처리에 의하여 SiOCH 박막 내의 메틸기의 해리에 의한 산소 원자 및 탄소 원자가 Si 원자와의 재결합은 박막 내에 Si-O-Si(C) cross link 및 Si-O-Si(C) open link 모드의 중첩비중을 변형하며 유전상수를 낮추는 원인이 되는 것으로 이해될 수 있다.

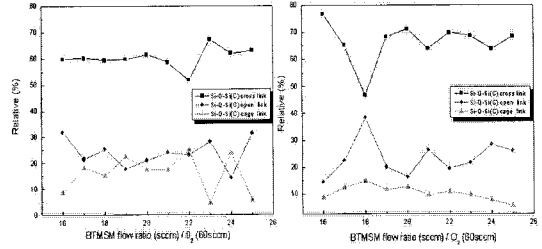


그림 4. 정사각형으로 표시된 Si-O-Si(C) cross link, 마름모로 표시된 open link, 삼각형으로 표시된 cage link의 상대적인 함유량 a) 상온증착 막과 b) 열처리 막.

Fig. 4. Relative contents of Si-O-Si(C) cross link marked with square, open link marked with lozenge and cage link marked with triangle in (a) As-deposited films and (b) Annealed films.

유량변화에 따른 SiOCH 절연막의 유전상수 값의 변화는 Al-SiOCH-Si (MIS) 구조를 제작하여 1 MHz에서 C-V 특성 곡선으로부터 추정하였다. 알루미늄 금속 쪽에 부의 전압을 인가하여 p형 Si 반도체의 다수캐리어인 holes 절연막과 반도체의 경계면으로 완전히 이동되는 포화상태에서 전체 정전용량은 다음과 같이 근사적으로 절연막의 인가된 부의 전압에서 포화되는 정전용량 값으로부터 1 MHz의 고주파수 영역 유전상수를 계산하였다.

$$C_{total} = \frac{C_i \cdot C_S}{C_i + C_S} \approx C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_o A}{d}$$

위의 수식을 이용한 절연막의 유전상수와 633 nm 광원에서 Ellipsometry를 이용하여 측정된 유전막의 굴절률을 표 1에 나타내었다.

표 1에서 알 수 있듯이 열처리 이후 이온분극에 의한 유전상수와 전자분극에 의한 유전상수는 모두 감소하였다. 절연막 내로 입사된 633 nm 광원의 굴절은 절연막 내의 상존하는 전자에 의해 산란을 함으로써 나타나는 현상으로, 굴절률의 감소는 전자밀도의 감소로 설명되어진다. 절연막 내의 전자밀도의 감소는 열처리에 의한 박막 밀도의 감소와 연동된 것으로 볼 수 있으며, 이는 유전상수를 감소시키는 원인이 될 것으로 추정된다.

그러나 전자밀도 감소에 의한 유전상수의 감소는 이온분극에 의한 유전상수 변화보다 유량변화에 민감하게 반응하지는 않는다. 1 MHz 에서 측정된

표 1. 이온분극(C-V 1 MHz)에 의한 유전상수와 전자분극(Ellipsometer 633 nm)에 의한 유전상수.

Table 1. Dielectric constants of ionic polarizability and electronic polarizability.

BTMSM(%)	Dielectric constant (C-V 1MHz)		Refractive index (Ellipsometer 633nm)		Dielectric constant n ² (공정물의 재질)	
	As-deposited	Annealed	As-deposited	Annealed	As-deposited	Annealed
BT16	2.31	2.11	1.453	1.424	2.111	2.027
BT17	2.61	2.25	1.451	1.415	2.105	2.002
BT18	2.16	1.89	1.451	1.414	2.105	1.999
BT19	2.16	1.89	1.452	1.425	2.108	2.050
BT20	2.25	1.67	1.452	1.416	2.108	2.005
BT21	2.29	1.76	1.453	1.42	2.111	2.016
BT22	1.99	1.93	1.452	1.429	2.108	2.042
BT23	2.29	1.86	1.455	1.434	2.117	2.056
BT24	2.82	2.13	1.453	1.414	2.111	1.999
BT25	2.57	1.98	1.453	1.423	2.111	2.024

유전상수가 BTMSM 유량이 증가함에 따라 급격히 변하고 있는 반면, 전자분극에 의한 유전상수 n² 값에는 커다란 변화가 나타나지 않는다. 이는 전자분극에 의한 기여가 유전상수 감소에 큰 영향을 주지는 않는다고 볼 수 있다. 즉, 유전상수에 기여하는 주요인은 이온분극 감소에 의한 것임을 추정할 수 있다.

열처리 후 유전상수와 굴절률은 모두 감소하였다. 유전상수는 열처리 후 0.2에서 크기는 0.8까지 감소하였으며, BTMSM 유량이 20 sccm인 시편에서 가장 낮은 1.67을 얻었다. 전구체의 유량이 18 sccm인 시편은 다른 시편들과는 달리 열처리 이후 유전상수가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 그림 4에서 나타난 탄소의 변화와 관련이 있다. 그림 4에서 Si-O-Si(C) cross link 모드의 중첩비중이 열처리 후 15 % 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 열처리 후 탄소가 빠져나가 Si-O 결합이 더 견고해짐을 의미한다. 따라서, SiOCH 박막에서 유전상수가 낮아지는 원인은 Si-O-Si(C) cross link 증가에 따른 자유공간의 증가 현상이 주요 원인된 것으로 추정된다. 탄소는 Si-O 결합을 끊어 나노 기공형성 혹은 자유공간을 증가시켜 전체적으로 박막의 밀도를 감소시키며, 결국 박막 전체의 이온 분극률을 떨어뜨려 낮은 유전상수를 갖게 하는 역할을 하는 것으로 이해된다.

표 1에서 20, 21 sccm 시편에서 유전상수 값이 매우 낮게 나왔다. 이 값은 여러 번의 측정에 의한 평균값이며, 좀 더 정확한 경향성을 보기 위해 C-V plot 을 미분한 후 형성된 면적을 그림 5에

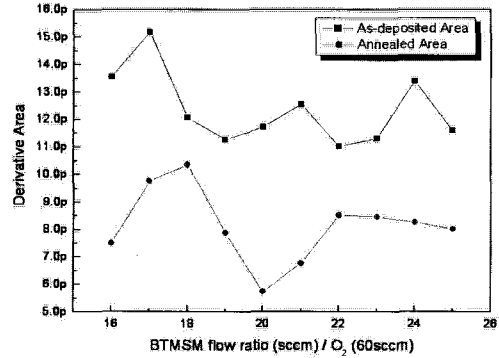


그림 5. a) 정사각형로 표시된 상온증착 막과 b) 삼각형으로 표시된 열처리 막의 이온농도를 나타내는 dc/dv의 적분 면적.

Fig. 5. Derivative Areas of dC/dV illustrating the ionic concentrations of as-deposited films marked with square in (a) and annealed films marked with solid circle in (b).

표시하였다. 1 MHz의 인가 전압의 변화에 대한 정전용량의 변화율을 나타내는 dC/dV에 대하여 effective flat band를 형성하는 지점을 기준으로 dC/dV는 peak를 형성하며 peak의 면적은 인가전압에 대하여 충전되는 대전체들의 총량으로 이해된다[14]. 따라서 역방향 인가전압에 대하여 경계면에 포화되어 축적되는 이온 분극성이 큰 물질들이 열처리에 의하여 소멸되는 것으로 이해되며, 이는 절연막 내부의 박막의 밀도가 감소되는 것과 직접관련이 있는 것으로 판단된다. 유량변화에 따라 미분 정전용량의 총량은 열처리 후 전체적으로 감소되었으며 특히 유량이 20, 21 sccm인 시편의 경우 낮게 나타났다. 표 1에 나타난 결과와 같이 열처리에 의하여 유전상수를 2.0 이하로 떨어뜨리는 효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

BTMSM 프리커서 유량을 변화시켜가며 SiOCH 박막을 형성하였다. 메틸기와 관련된 결합그룹들은 유량변화에 대하여 유사하게 반응하는 경향성을 보이며 동시에 열처리에 대하여서도 피크의 세기 변화는 유사한 결과를 보였다. SiOCH 박막을 열처리 후 상대적인 탄소함량은 증가하였으며, 이에 따라 유전상수 값이 낮아졌다. 전구체 유량에 대하여 C-V 특성 실험으로부터 획득한 유전상수는 근사

적으로 2.34이었으며, 열처리 후 획득된 유전상수는 1.99로 낮아지는 현상을 확인하였다. 이러한 결과는 SiOCH 박막을 구성하는 결합그룹들 사이의 상관관계가 전구체의 유량비에 따라 민감하게 반응하고 있으며, 열처리에 의하여 메틸기의 해리 및 재결합으로 인하여 박막의 전자 밀도가 감소하고, 결합구조 내의 자유공간을 증가시키는 방향으로 진행되어 유전상수를 낮추는 것으로 이해되었다. $k < 2.0$ 이하의 매우 낮은 유전상수를 갖는 시편들을 좀 더 정확한 경향성을 보기 C-V plot 을 미분하여 그 면적을 구하였으며 유전상수와 같은 경향성을 확인하였다. 계속되는 연구에서는 반복되는 실험을 통해 보다 안정적인 저 유전상수 획득 기구에 대하여 검증할 계획이다.

참고 문헌

- [1] N. B. Park and Y. P. Park, "Phase intergrowth in the syntheses of BscCo thin film", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 15, No. 8, p. 736, 2002.
- [2] W. W. Lee and P. S. Ho, "Low dielectric constant materials for ULSI interlayer dielectric applications", MRS Bulletin, Vol. 22, No. 10, p. 19, 1997.
- [3] S. P. Muraka, "Low dielectric constant materials for interlayer dielectric applications", Solid State Technology, Vol. 39, No. 3, p. 34, 1996.
- [4] C. H. Ting and T. E. Seidel, "Methods and needs for low-k material research", Mat. Res. Symp. Proc., Vol. 381, p. 3, 1995.
- [5] Y.-H. Kim, S.-K. Lee, and H. J. Kim, "Low-k Si-O-C-H composite films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition using bis-trimethylsilylmethane precursor", J. Vac. Sci. Tech. A, Vol. 18(4), Part 2, p. 1216, 2000.
- [6] Y.-H. Kim, "Deposition and characterization of low-dielectric-constant SiOCH thin films for interlayer dielectrics of multilevel interconnection", Ph.D. Dissertation, Seoul National University, 2002.
- [7] Nara, A., and Itoh, H., "Low dielectric constant insulator formed by downstream plasma CVD at room temperature using TMS/O₂", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, p. 1477, 1997.
- [8] Grill, A. and Patel, V., "Low dielectric constant SiCOH films as potential candidates for interconnect dielectrics", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 565, p. 107, 1999.
- [9] S.-Y. Jing, H.-J. Lee, and C. K. Choi, "Chemical bond structure on Si-O-C composite films with a low dielectric constant deposited by using inductively coupled plasma chemical vapor deposition", J. of Korean Physical Society, Vol. 41, p. 769, 2002.
- [10] Noda, I., "Generalized two-dimensional correlation method applicable to infrared, raman, and other types of spectroscopy", Appl. Spectroscopy, Vol. 47, p. 1329, 1993.
- [11] Noda, I., Dowrey, A. E., and Marcott, C., "Recent developments in two-dimensional infrared (2D IR) correlation spectroscopy", Appl. Spectroscopy, Vol. 47, p. 1317, 1993.
- [12] Y.-O. Kim, Y. M. Jung, S. B. Kim, and S.-M. Park, "Two-dimensional correlation analysis of spectroelectrochemical data for p-benzoquinone reduction in acetonitrile", Anal. Chem., Vol. 76, No. 17, p. 5236, 2004.
- [13] Grill, A., Perraud, L., Patel, V., Jahnes, C., and Cohen, S., "Ultralow-k dielectrics prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition", Applied Physics letters, Vol. 79, p. 803, 2001.
- [14] S. M. Sze, "Physics of semiconductor devices", John Willey & Sons, New York, Chap. 7, 1981.