

논문 21-12-6

Ellipsometry를 이용한 Low-k SiOCH 박막의 유전특성에 관한 연구

A Study of the Dielectric Characteristics of the Low-k SiOCH Thin Films by Ellipsometry

이인환^{1,a}, 황창수², 김홍배³
(In-Hwan Yi^{1,a}, Chang-Su Hwang², and Hong-Bae Kim³)

Abstract

We studied the dielectric characteristics of low-k SiOCH thin films by Ellipsometry. The SiOCH thin films were prepared by deposition of BTMSM precursors on p-Si wafer by CCP-PECVD method. The nano-porous structural organic/inorganic hybrid-type of SiOCH thin films correlated directly to the formation of low dielectrics close to pore(k=1). The structural groups including highly dense pores in SiOCH thin films originated the anisotropic geometry type of network structure directing to complex refractive characteristics of SiOCH single layer on the p-Si wafer. The linearly polarized beam of Xe-ramp in the range from 190 nm to 2100 nm introduced to the surface of SiOCH thin film, and the reflected beam was Elliptically polarized by complex refractive coefficients of SiOCH dipole groups. The amplitude variation Ψ and phase variation Δ of the relative reflective coefficients between perpendicular and parallel components to the incident plane were measured by Ellipsometry. The complex optical constants n and k as well as the dielectric constant and thickness of SiOCH thin films were driven by the measured value of Ψ and Δ .

Key Words : Low-k, Ellipsometry, Index of refraction, Dielectric constant

1. 서론

ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors)에 의하면 VLSI에서 요구되는 고-성능 및 저-소비전력과 고-집적화의 경향을 유지하기 위한 공정 미세화에 대한 기술과제를 전-공정과 후-공정에서 나눌 수 있다. 전-공정에서는 저-오프링 및 고-구동 전류의 트랜지스터를 실현하기 위하여, 기생 저항이 낮고 얇은 접합과 고-신뢰

성으로 높은 용량을 실현하는 게이트 절연막 및 저-저항 게이트 전극이 요구된다. 후-공정에서는 높은 신뢰성의 저-용량 및 저-저항의 다층배선을 실현하는 High-Aspect Ratio공정에서의 낮은 저항과 낮은 누설 전류 그리고 낮은 정전용량의 Contact, Via 및 ILD(Interlayer Dielectric)를 갖은 배선이 요구된다[1]. 전-공정에서는 높은 유전율의 박막 재료 개발이 중심이고, 후-공정에서는 Low-k 박막 재료의 개발과 Cu 배선 모듈 개발이 핵심이 된다. ILD 및 금속 접촉면에서의 RC 결합에 의한 전력량 손실을 감소하기 위하여 금속 배선을 낮은 전기 저항 값을 갖는 Cu 배선으로 대체하고 있으며, 신 재료 기술 개발에 맞추어 후-공정에서는 낮은 유전상수를 갖는 유전체로의 대체가 진행되고 있다[2,3]. 이는 후-공정에서 Low-k 재료의 개발과 Cu-Damascene 배선 구조와의 집적 기

1. 청주대학교 전자공학과
(충북 청주시 상당구 내덕동 36)
2. 공군사관학교 물리학과
3. 청주대학교 전자정보공학부
a. Corresponding Author : 00470367@cju.ac.kr
접수일자 : 2008. 10. 24
1차 심사 : 2008. 11. 18
심사완료 : 2008. 11. 24

술로서 SiO₂를 대신할 수 있는 게이트 절연막 또는 ILD를 위한 재료 및 공정 기술의 개발을 의미한다. 이에 따라 최근 세계적인 반도체 회사들의 저-유전율 절연막 공정기술 개발로 유전율 $k = 2.0$ 이하의 low-k 물질 개발에 병행하여, 유전상수 $k = 1.0$ 인 진공 상태의 기공을 포함한 $k = 1.5$ 이하 유전율의 nano-porous 구조 유/무기 하이브리드형 물질 박막을 차세대 반도체 소자의 절연물질로 적용하려는 연구가 필요하다[4].

본 연구에서는 BTMSM(Bis(trimethyl)silylmethane) 전구체를 CCP-PECVD 방법으로 증착된 SiOCH 박막의 저-유전상수 특성을 SE(Spectroscopic Ellipsometer)를 이용하여 분석하였다.

2. 실험

Low-k 절연막을 제작하기 위하여 BTMSM 전구체를 PECVD P-5000(by AMAT)을 이용하여 P-type (100) Si 기판위에 SiOCH 박막을 증착하였다. 증착된 SiOCH 절연막은 산소의 고정유량에 대한 BTMSM 전구체의 상대 유량비를 변화하여 실리콘(Si) 원자, 탄소(C) 원자 및 산소(O) 원자의

표 1. PECVD P-5000 공정 조건.

Table 1. PECVD P-5000 process recipe.

Susceptor gap	500 mils (12.7 mm)	
Process step time	10 s	
Substrate temp.	100 °C	
Pressure	Servo 3.0 Torr	
RF power, match, mode	450 W , Auto , B-to-B	
Used Gas and flows (sccm)	O ₂	60
	Ar-BT	16 - 25 (1step)

결합으로 형성된 Cross-link 및 Network-link 구조 내에 포함된 기공에 의하여 저-유전 상수를 갖도록 하였다. 공정 조건은 표 1과 같으며, BTMSM 전구체 유량비에 따라 증착된 SiOCH 박막들의 열처리 전/후의 특성 분석을 위하여 450 °C로 30분 동안 진공 상태에서 급속열처리(RTP) 공정을 실시하였다. 증착 및 열처리된 박막은 그림 1 Horiba Jobin Yvon 사의 UVISEL Spectroscopic Ellipsometer(SE) model uvsel/fpd-121를 이용하여 Air - SiOCH - Semiconductor 경계 구조에서

SiOCH 절연막의 유전상수, 굴절률 및 두께 등의 데이터를 획득하였다.

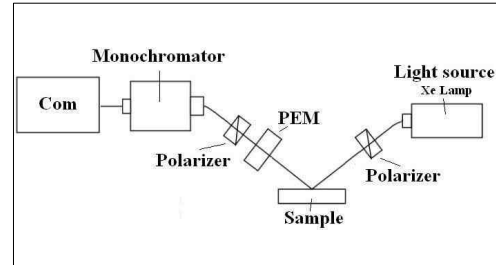


그림 1. Horiba Jobin Yvon사의 UVISEL Spectroscopic Ellipsometer.

Fig. 1. UVISEL Spectroscopic Ellipsometer by Horiba Jobin Yvon.

Ellipsometry에 사용된 장치는 그림 1과 같이 SE 시스템으로서 Xe - ramp를 이용하여 190 nm에서 2100 nm까지의 광대역으로 발진된 광원을 고정된 선형편광 필터를 통과 시킨 후 시편에 입사시켰다. 박막의 표면으로부터 반사되는 타원편광된 반사파의 진폭비와 위상차를 측정하고, 측정된 진폭비와 위상차를 분산 모델을 적용하여 유전상수 및 관련 실수부, 허수부를 추출하였다[5]. 선형 편광된 입사파를 Air - Insulator(SiOCH thin film) - Si(p-type) 구조로 제작된 시편에 대하여 65°로 입사시켰다. 입사파가 SiOCH 절연층 내로 전파되어감에 따라 SiOCH 절연물질의 망상구조에 의한 복굴절률에 의하여 타원편광된 전자기파가 시편으로부터 반사된다. 반사파에 중첩되어 있는 S파(입사 면에 수직으로 편광된 TE wave)와 P파(입사 면에 평행하게 편광된 TM wave)의 상대적인 진폭 및 위상 차이를 측정하기 위하여 50 kHz 광탄성위상변조기(PEM : Photoelastic modulator)로 반사파를 위상변조하였다. 위상 변조된 반사파를 선형편광 후 입사파장에 따라 광분해하여 S파와 P파의 진폭비와 위상차를 측정하였다. 복굴절 광학상수는 이온의 전기 쌍극자 등에 밀접한 관련을 갖고 있기 때문에 광통신을 포함한 기초 광학 소자의 설계에 매우 중요한 요소이며[6], 따라서 박막의 반사계수 및 소광계수를 결정하는 것은 매우 중요한 광학적 요소로 고려된다[7,8]. Ellipsometer로 측정된 S파와 P파의 진폭비와 위상차를 이용하여 low-k SiOCH 절연막의 광학상수, 막의 두께, 굴절률 및 유전상수를 획득하였다.

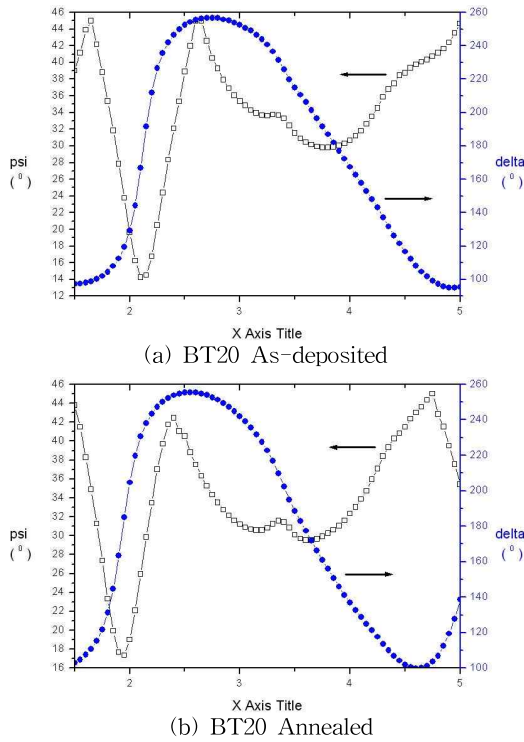


그림 3. Ellipsometer에 의한 진폭비와 위상차의 측정 데이터. (a) BT20 As-deposited, (b) BT20 Annealed.

Fig. 3. Result of Psi and delta by Ellipsometer (a) BT20 As-deposited, (b) BT20 Annealed.

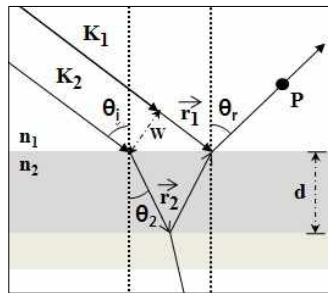


그림 4. SiOCH 박막에 의한 반사파의 경로차.
Fig. 4. The route of incident wave and reflective wave into the SiOCH thin film.

굴절, 반도체 경계 면에서 반사 및 공기층으로 투과한다. 두 개의 평면파(k₁, k₂)가 그림 4에서처럼 입사하기 전 평행한 지점부터 반사파가 중첩되는

지점까지 발생되는 경로차는 수식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= 2x\hat{i} - \omega p_1\hat{j} & r_1 &: \text{표면 거리 차} \\ \vec{r}_2 &= x\hat{i} - d\hat{k} & r_2 &: \text{내부 침투 반사} \end{aligned}$$

$$\vec{\beta} = 2\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 = 4\pi \frac{d}{\lambda} \hat{n}_2 \cos \theta_2 \quad (4)$$

$$(n_2 \cos \theta_2 \cong p + iq)$$

수식 (4)에서 경로차($\hat{\beta}$)는 유전체의 복소굴절률에 의해 복소경로차로 정의된다.

$$\begin{aligned} Re(\hat{\beta}) &= 2d \frac{w}{c} p: \text{실수위상차}, e^{iRe(\hat{\beta})} \\ Im(\hat{\beta}) &= 2d \frac{w}{c} q: \text{감쇄위상차}, e^{-Im(\hat{\beta})} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 그림 4의 P점에서 측정되는 반사파는 무한급수의 평행한 평면파들이 공기와 유전체의 경계면 및 유전체와 반도체 경계면에서 여러 번 반복하여 반사된 파들의 중첩으로 구성되며, 반사계수는 아래 수식 (6)과 같이 무한급수의 합으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \hat{r} &= \hat{r}_{12} + \hat{t}_{12}\hat{r}_{23}\hat{t}_{21}e^{i\hat{\beta}} + \hat{t}_{12}\hat{r}_{23}\hat{r}_{21}\hat{r}_{23}\hat{t}_{21}e^{i\hat{\beta}} + \dots \\ \hat{r}_{s,p} &= \frac{\hat{r}_{12} + \hat{r}_{23}e^{i\hat{\beta}_{s,p}}}{1 + \hat{r}_{12}\hat{r}_{23}e^{i\hat{\beta}_{s,p}}} \end{aligned} \quad (6)$$

위의 수식에서 \hat{r}_{12} 는 SiOCH 박막에서 직접 반사되는 반사파의 복소반사계수이며, \hat{r}_{23} 은 Si 반도체 표면에서 SiOCH 박막으로 반사되는 반사파의 복소반사계수이고, $\hat{\beta}$ 는 SiOCH 박막 내에서 한번 왕복하여 전파될 때 발생하는 복소경로차이다. SiOCH 박막으로 입사되는 선형편광된 입사파의 S 파와 P파가 SiOCH박막 표면에서 직접 반사하는 경우의 반사계수와 Si 반도체 표면에서 반사하는 경우의 반사계수는 다음 수식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{r}_{s12} &= \frac{n_1 \cos \theta_1 - \hat{n}_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + \hat{n}_2 \cos \theta_2} \\ \hat{r}_{p12} &= \frac{\hat{n}_2 \cos \theta_1 - \hat{n}_1 \cos \theta_2}{\hat{n}_2 \cos \theta_1 + \hat{n}_1 \cos \theta_2} \\ \hat{r}_{s23} &= \frac{\hat{n}_2 \cos \theta_2 - \hat{n}_3 \cos \theta_3}{\hat{n}_2 \cos \theta_2 + \hat{n}_3 \cos \theta_3} \\ \hat{r}_{p23} &= \frac{\hat{n}_3 \cos \theta_2 - \hat{n}_2 \cos \theta_3}{\hat{n}_3 \cos \theta_2 + \hat{n}_2 \cos \theta_3} \end{aligned} \quad (7)$$

수식 (7)에서 SiOCH 절연층과 Si 반도체의 굴절률은 경계면 부근에 침투해있는 이온성(CH_x, H) 분순물에 의한 감쇄인자의 영향을 고려하여 복소굴절률 \hat{n}_2 와 \hat{n}_3 를 적용하였다. 수식 (4)와 수식 (7)을 수식 (6)에 적용하면 S파와 P파의 반사계수를 각각 복소굴절률 \hat{n}_2 와 \hat{n}_3 그리고 SiOCH 박막의 두께 d 및 입사광원의 에너지(파장)의 함수로 표시된다. 따라서 측정된 S파와 P파 반사파의 편광 비는 입사광원의 파장에 따른 SiOCH 절연층의 복소굴절률 \hat{n}_2 와 절연층의 두께 d 및 Si 반도체의 복소굴절률 \hat{n}_3 의 의존성을 갖는다.

유전체에서 맥스웰 파동방정식은 수식 (8)과 같다.

$$\nabla_2 E = \frac{1}{c^2} \varepsilon(\omega) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (8)$$

수식 (8)에서 유전체의 유전율은 복소유전율로 정의되며, 굴절률과의 관계는 수식 (9)와 같다.

$$(n^2 - k^2) + i2nk = \varepsilon_r(\omega) + i\varepsilon_i(\omega) \quad (9)$$

수식 (9)에서 소광 계수 k는 전도성 물질에 의한 에너지 소멸 정도를 나타내며, 복소광학상수에 수식 (10) - (12)의 에너지 분산 관계식을 적용하면 유전율에 대한 관계식이 유도된다. 전자기파에 대한 유전체의 반응들은 아래의 수식 (10) - (12)와 같이 Single oscillator, Double oscillator, Free electron 등으로 구분된다.

Single oscillator

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega_t^2}{\omega_i^2 - \omega^2 + i\Gamma_0 \omega} \quad (10)$$

Double oscillator

$$+ \sum_{j=1}^2 \frac{f_j \omega_{0j}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\tau_j \omega} \quad (11)$$

Drude Model for metal

$$- \frac{\varepsilon_s \omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma_D \omega} \quad (12)$$

- $\varepsilon_\infty, \varepsilon_s$: High frequency and static dielectric constants.
- $\Gamma_0, \Gamma_D, \tau_j$: Damping factors. ($\tau_j, \Gamma_0, \Gamma_D > 0$).
- f_i : Oscillator strength parameter.
- $\omega_{0j}, \omega_t, \omega_p$: Oscillator, transverse and plasma frequency respectively (eV).

반사파들의 중첩으로 구성된 수식 (6)의 무한급수의 합은 수식 (7)과 같이 각 매질의 굴절률을 포함하는 함수로 표현되며, 또한 복소굴절률과 복소유전율로 나타낼 수 있다. 그러나 수식 (12)와 같은 free electron(CH_x)들의 유전상수 기여도는 SiOCH 박막에 대한 FTIR Spectrum(그림 5) 분석을 통하여 무시할 정도로 작고, 이를 통하여 SiOCH 박막의 저-유전상수 결정 요인을 추측 할 수 있다. 전기적으로 중성이지만 원자의 구속 전자가 외부 전자기파에 의하여 진동함으로써 막의 유전특성이 결정되며, SiOCH 박막에서는 i = 1 : Si - O - CH₃, i = 2 : Si - O - Si(C), i = 3 : Si - CH₃, i = 4 : Si - H, i = 5 : CH_x 등의 Main pick를 보이는 결합 그룹들로서 나타났다.

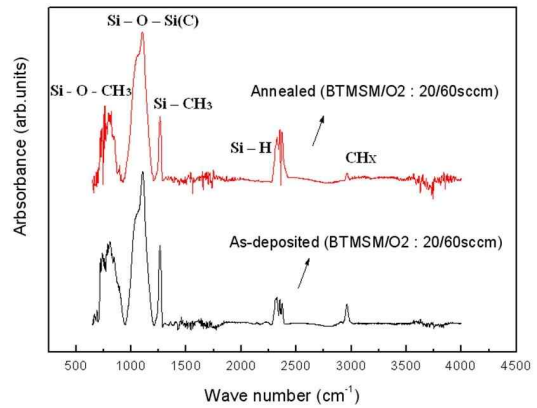


그림 5. O₂ 60 sccm과 BTMSM 20 sccm의 비율로 증착된 샘플에 관한 FTIR 스펙트럼 분석 결과.

Fig. 5. The FTIR Spectrum Analysis result of the sample (O₂ 60 sccm / BTMSM 20 sccm).

이러한 결합 그룹은 외부 전자기파의 에너지에 따라 저-유전 상수 특성을 결정하는 중요한 메커니즘으로서 수식 (11)과 같이 single 혹은 double oscillator에 관련된 함수들로 표현 할 수 있다. 그러나 본 실험 결과에서 double oscillator에 대한 기여를 무시한다면, 수식 (13)과 같이 표현할 수 있으며, f_i는 각각의 결합 그룹 모드의 세기를 나타낸다.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^5 \left[\varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_{is} - \varepsilon_{ip})\omega_i^2}{\omega_i^2 - \omega^2 + i\Gamma_0 \omega} \right] f_i \quad (13)$$

표 2. BTMSM의 상대 유량에 대한 SiOCH 박막의 두께와 굴절률 및 유전상수[10].

Table 2. The thickness and refractive index and dielectric constant of SiOCH thin film with various BTMSM rates[10].

BTMSM (%)	Thickness (d)		Refractive index (n)		Dielectric constant (k)			
	nm		Ellipsometer 633 nm		n ²		C - V 1 MHz	
	As-depo	Annealed	As-depo	Annealed	As-depo	Annealed	As-depo	Annealed
BT16	144	137	1.453	1.424	2.11121	2.02778	2.31	2.11
BT17	133	135	1.451	1.415	2.10540	2.00223	2.61	2.25
BT18	131	130	1.451	1.414	2.10540	1.99940	2.10	2.34
BT19	139	148	1.452	1.425	2.10830	2.03062	2.16	1.88
BT20	147	149	1.452	1.416	2.10830	2.00506	2.25	1.67
BT21	143	144	1.453	1.420	2.11121	2.01640	2.29	1.76
BT22	142	137	1.452	1.429	2.10830	2.04204	1.99	1.93
BT23	151	153	1.455	1.434	2.11703	2.05636	2.29	1.86
BT24	145	159	1.453	1.414	2.11121	1.99940	2.82	2.13
BT25	137	166	1.453	1.423	2.11121	2.02493	2.57	1.98

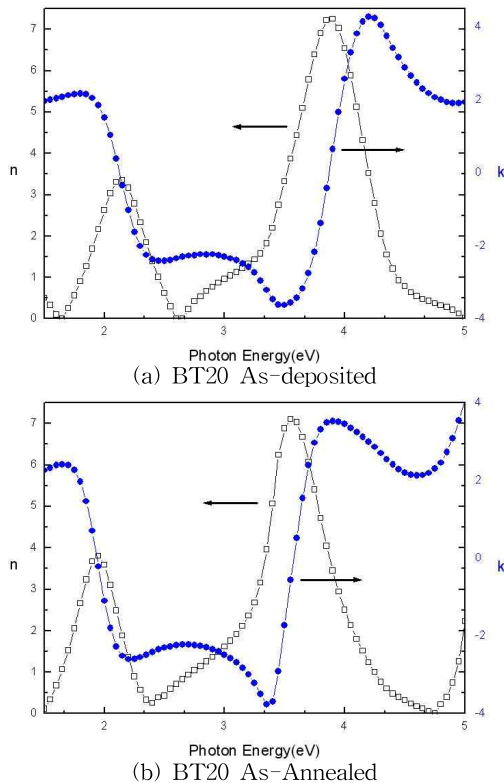


그림 6. Ellipsometer에 의한 소멸계수와 반사계수의 측정 데이터. (a) BT20 As-deposited, b) BT20 Annealed).

Fig. 6. Result of extinction coefficient and index of refraction by Ellipsometer (a) BT20 As-deposited, b) BT20 annealed).

그림 6은 CCP-PECVD P-5000(by AMAT)을 이용하여 P-type(100) Si 기판위에 BTMSM / O₂의 비율을 20 / 60 sccm으로 10초간 증착시킨 SiOCH 박막에 대한 Horiba Jobin Yvon사의 UVISSEL Spectroscopic Ellipsometer (model uvsel/fpd-12) 측정 데이터를 DeltaPsi™2 software (by Horiba Jobin Yvon)를 통해 Single Oscillator model을 적용한 소광 계수와 굴절률의 결과이다. Photon Energy에 대한 굴절률과 소광계수 중 Long wave length limit region(633 nm)에서 획득한 SiOCH 박막의 굴절률은 표 2와 같다. 제작된 SiOCH 박막의 두께는 열처리 전 약 141 nm에서 열처리 후 145 nm이고, Ellipsometer로 측정된 굴절률은 열처리 전 약 1.452(1)에서 열처리 후 약 1.42(1)로 감소하였으며, 소광 계수 k를 0으로 근사시킨 후 측정된 유전상수는 열처리 전 2.11(1)에서 열처리 후 2.03(2)으로 감소하였다. 또한, MIS(Al - SiOCH - Si)구조로 제작하여 1 MHz에서의 C - V 측정값을 통하여 계산된 SiOCH 박막의 유전율은 근사적으로 열처리 전 2.34 열처리 후 1.99이었다. 각 데이터들이 오차들을 포함하고 있지만, 두 데이터 모두 열처리 전/후의 유전상수 감소를 나타내고 있다. 이는 C - V 특성 곡선을 통한 유전상수 특성 분석뿐만 아니라, Ellipsometry를 이용한 유전상수의 특성 분석이 전체적으로 비슷한 경향성을 보이는 것으로 확인 할 수 있으며, 두 유전상수의 차이는 전자 밀도에 의한 유전상수와 이온 분극에 의한 유전상수의 변화로 설명 할 수 있다[9].

4. 결론

본 연구에서는 P-type(100) Si 기판 위에 BTMSM

전구체를 CCP-PECVD system을 이용하여 SiOCH Single Layer thin film을 증착하고, 입사파와 반사파 변화 및 각 계수들 간의 연관성을 통하여, 굴절률의 증가와 감소는 유전율과 밀접한 관계를 갖고 있으며, 이는 Ψ , Δ 와 같이 n , k , d 그리고 ω 와 관계하는 Ellipsometry Parameter들에 관계함을 확인하였다. Si 기판과 SiOCH 박막의 경계면에 존재하는 이온성(CH_x , H) 불순물에 의한 유전특성과 SiOCH 결합그룹의 전기쌍극자에 의한 유전특성이 입사파에 대한 반사파의 편광을 변화시키는 것으로 추정된다. 반사파들의 중첩으로 구성되는 무한급수의 합은 각 매질의 굴절률을 포함하는 함수로 나타낼 수 있으며, 복소유전율과 전자인자 k 로 표현하였다. 그러나 FTIR Spectrum의 분석을 통하여 CH_x , H와 같은 이온성 성분의 비율이 무시할 수 있을 정도로 매우 작음을 확인하였고, 이를 통하여 SiOCH 박막의 저 유전상수 결정 요인을 Si - O - CH_3 , Si - O - Si(C), Si - CH_3 등으로 정의하였다. 이는 전기적으로 중성이지만 원자의 구속 전자가 외부 전자기파에 의하여 진동하는 경우, 막의 유전특성을 결정하는 것을 표현하고, 이러한 결합 그룹을 외부 전자기파(w)의 에너지에 따라 저-유전 상수의 특성을 결정하는 중요한 메커니즘으로서 작용을 한다. 또한, 증착된 박막을 MIS(Al - SiOCH - Si)구조로 제작하여 1 MHz에서 측정된 C - V 데이터를 통하여 계산된 유전상수와 Ellipsometry를 이용한 유전상수의 특성 분석 결과가 전자 밀도에 의한 유전상수와 이온 분극에 의한 유전상수의 변화에 따른 차이를 포함한 전체적으로 비슷한 경향성을 보이는 것으로 확인하였다. 그리고 다음의 실험을 통하여 박막 내 파형의 시뮬레이션 및 각 그룹별 유전율에 대한 기여도의 모델링을 통하여 보다 정확한 low-k 유전특성의 결정 원인을 밝혀나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고 문헌

[1] W. W. Lee and P. S. Ho, "Low dielectric

constant materials for ULSI interlayer dielectric applications", MRS Bulletin, Vol. 22, Issue 10, p. 19, 1997.

- [2] S. P. Muraka, "Low dielectric constant materials for interlayer dielectric applications", Solid State Technology, Vol. 39, Issue 3, p. 34, 1996.
- [3] C. H. Ting and T. E. Seidel, "Methods and needs for low-k material research", Mat. Res. Symp. Proc., Vol. 381, p. 3, 1995.
- [4] N. Vets, M. Smet, and W. Dehaen, "Synthesis and thermolysis of a Diels - Alder adduct of pentacene and thiophosgene", Tetrahedron Letters, Vol. 45, Issue 39, p. 7287, 2004.
- [5] Q. H. Li, D. Zhu, and W. Liu, "Optical properties of Al-doped ZnO thin films by Ellipsometry", Applied Surface Science, Vol. 254, p. 2922, 2008.
- [6] H. Neumann, W. Horing, and E. Reccius, "Growth and optical properties of CuGaTe₂ thin films", Thin Solid Films, Vol. 61, p. 13, 1979.
- [7] Y. C. Liu, S. K. Tung, and J. H. Hsieh, "Influence of annealing on optical properties and surface structure of ZnO thin films", Journal of Crystal Growth, Vol. 287, Issue 1, p. 105, 2006.
- [8] Y. C. Liu, J. H. Hsieh, and S. K. Tung, "Extraction of optical constants of zinc oxide thin films by ellipsometry with various models", Thin Solid Films, Vol. 510, Issues 1-2, p. 32, 2006.
- [9] T.-H. Baek, M.-S. Kim, and H. Kim, "Measurement of principal stress direction by photoelastic phase shifting method", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 12, p. 1982, 2004.
- [10] J.-W. Kim, C.-S. Hwang, and H.-B. Kim, "Properties of SiOCH thin film dielectric constant by BTMSM/O² flow rates", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 21, No. 4, p. 362, 2008.