

후 열처리에 따른 저유전율 SiOC(-H) 박막의 특성연구

장용준, 최치규

제주대학교 물리학과

Abstract

Recently, materials with a low dielectric constant are required as interlayer dielectrics for the on chip interconnection of ultra-large-scale integration devices to provide high speed, low dynamic power dissipation and low cross-talk noise. low-k SiOC(-H) films with nano-pore structure were deposited on p-type Si(100) substrates using UV-source assisted PECVD with a mixture of oxygen gas and DMDMS. FTIR spectroscopy performed in the absorbance mode was used to determine the related Si-O and Si-CH₃ bonding configuration in the film. The characteristics of nano-pore structure in the SiOC(-H) films were investigated by using Bruggeman's effective medium approximation, the dielectric constant of the films was investigated with a metal insulator semiconductor (MIS, Al/SiOC(-H) films/p-Si) structure at 1 MHz.

The SiOC(-H) dielectric films were prepared with various compositions and then subsequently annealed for 30 min in a vacuum at 100, 200, 300 and 400 °C. The dielectric constant decreased from 2.43 to 2.18 and the refractive index decreased from 1.44 to 1.42 in accordance with the increase of porosities from 42.04% to 49.72%. The current voltage analysis indicates that the leakage-current density is 5.55×10^{-8} A/cm² at an applied electric field of 1 MV/cm, and the dominant conduction mechanism is found to be Schottky emission in as-deposited and annealed SiOC(-H) films at mid electric field.

Key Words : PECVD, nano-pore, Low k thin film, Interlayer dielectric

1. 서 론

차세대 반도체 소자는 배선 간격이 감소됨에 따라 현재 사용되고 있는 SiO₂ 층간 절연

막을 사용하는 경우 기생 정전용량의 발생으로 소자의 신호 지연을 일으킨다. 이 기생 정전용량에 의하여 RC 시간 지연과 사용 전력량의 증가 그리고 상호간섭에 의한 잡음

등이 일어나 소자의 고속화에 장애 요인이 된다 [1]. 기존의 층간 절연 물질인 SiO_2 는 평탄화 특성은 우수하지만 단차 피복성이 나쁜 단점과 불순물 잔류와 큰 유전 상수로 인해서 고밀도, 고집적 고속 소자의 층간 절연 박막으로 사용하는데 어려움이 있다. 그리고 배선 폭의 미세화에 따라 배선 간격에 절연 물질을 완전하게 매설하는 것이 곤란한 실정이다 [2]. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 현재 배선 금속으로 사용되고 있는 알루미늄보다 전도도가 높은 구리를 배선으로 사용하는 공정이 개발되고 있으며, 이때 사용될 수 있는 2.0 이하의 저유전 상수를 갖는 층간 절연 박막에 대한 연구개발이 요구되고 있다.

현재 50 nm급 Cu/Low-k 소자 개발에서 나노-기공을 갖는 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막을 적용하려는 연구가 진행 중이다 [3,4].

나노 기공을 갖는 저유전율 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막은 CH_3 groups이 Si-O-Si network을 깨고 결합하면서 Si-O-C bond의 open link, ring link 그리고 cage link 모드 등으로 결합된다. 또한 탄소 원자의 농도가 증가 할수록 Si-O와 Si-C bond 사이의 결합각이 커진다. Si-O-C 결합각의 변화는 Si-O-Si network에 $-\text{CH}_n$ group이 결합되는 농도에 의존한다. 그리고 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막의 열처리 전·후 박막의 구조적 변화는 Si-O-Si bond에 결합되는 Si- CH_3 의 농도 변화에 따라 Si-O-C open link 모드가 ring link 모드로 변함에 따라 박막내의 안정적인 기공 (pore)를 형성하게 된다 [5,6]. 이러한 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막은 나노 기공 구조를 갖으면서 1.5 이하의 유전상수를 가질 수 있는 것으로 평가 되고 있고, 나노 기공 구조를 갖는 박막형성과 관련된

기술은 앞으로 반도체 산업의 핵심기술로 자리잡을 것으로 예측된다. 이와 같은 나노 기공 구조를 갖는 저유전 층간절연막의 형성에서 새로운 개념의 나노 복합체 하이브리드화 기술이 요구되고 있다 [6-9].

본 연구에서는 DMDMS (Dimethoxydimethylsilane : $\text{Si}(\text{OCH}_3)_2(\text{CH}_3)_2$)와 산소를 precursor로 사용하여 PECVD 방법으로 실온에서 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막을 형성한 다음 후 열처리에 따른 기공율과 박막의 유전율 특성을 조사하였다. 형성된 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막의 결합구조는 FTIR(Fourier transform infrared)을 이용하여 유량비와 열처리에 따른 박막내의 Si-O-Si, Si-O-C, Si- CH_3 그리고 OH와 관련된 결합구조의 변화를 조사하였다. 또한 기공율의 변화에 따른 전기적 특성은 Metal-Insulator-Semiconductor(AI/ $\text{SiOC}(-\text{H})$ /p-Si(100)) 구조로 형성한 후 1MHz의 전압을 인가하여 유전상수 및 누설 전류와 절연 파괴 전압 등을 측정하였다.

2. 실험 방법

50 nm급 Cu/Low-k 소자에 적용하기 위하여 나노-기공을 갖는 $\text{SiOC}(-\text{H})$ 박막을 DMDMS/ O_2 의 혼합된 precursor를 UV-assisted PECVD 방법으로 형성하였다. UV-assisted PECVD 장치는 반응로, ICP용 안테나, rf 전원으로 구성된 반응부와 dry/booster 펌프로 구성된 진공배기부, 그리고 반응가스를 주입시켜주는 가스 주입부로 되어 있다. 가스의 유량은 mass flow controller (MFC)로 제어 하도록 하였고 유량에 따른 진공도는 throttling valve에 의하여 자동으로

제어하도록 하였다. 진공도 측정은 baratron 게이지로 측정하였다. 13.56 MHz 주파수를 갖는 rf power는 최대 1 kW의 출력을 연속적으로 낼 수 있는 장치를 사용하였다. 반응로의 초기 진공도는 $\sim 10^{-3}$ Torr가 되도록 하였다. 반응로에 주입되는 DMDMS와 O₂가스의 총유량은 100 sccm으로 유지하였으며, 유량비 R(%)=[DMDMS/(DMDMS+O₂)]×100는 80%로 하였고 이때 반응로의 진공도는 250 mTorr로 고정하였다. 열처리 실온에서 형성하여 Ar 분위기에서 100, 200, 300 그리고 400 °C로 30 분동안 in-situ 열처리하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 실온에서 증착한 SiOC(-H) 박막과 100, 200, 300 그리고 400 °C로 열처리한 SiOC(-H) 박막의 FTIR 스펙트럼이다. wavenumber가 890, 1037.5, 1102.5, 1270 그리고 2970 cm⁻¹ 영역에서 나타난 스펙트럼은 Si-CH₃, Si-O-Si, Si-O-C, Si-CH₃ 그리고 CH_n (n=1,2,3) bond들이다. 그리고 wavenumber가 3720 cm⁻¹ 근처 영역에서 나타난 스펙트럼은 H-OH stretching 모드이다. 이들 스펙트럼은 전형적인 SiOC(-H) 박막에 대한 것이고, 열처리 온도에 관계없이 동일한 스펙트럼으로 나타났다. wavenumber가 1000 cm⁻¹에서 1250 cm⁻¹ 영역 사이에서는 Si-O-Si와 Si-O-C asymmetric stretching bond가 중첩되어 있다. 이 결과는 형성된 SiOC(-H) 박막이 나노-기공을 함유하고 있음을 의미한다 [10]. 일반적으로 나노-기공을 갖는 SiOC(-H) 박막 형성은 실리콘 기판 표면에 흡착된 bond들은 Si-O, Si-CH₃, CH_n

그리고 H-OH 등으로 연결 구조를 갖는다. 이러한 연결구조에서 Si-CH₃ bond는 Si-O-Si bond 구조를 끊고 Si-O-CH₃ 결합에 참여한다. 그리고 -CH₃ group은 다른 bond와 결합되지 않기 때문에 SiOC(-H) 박막 내에 나노-기공을 형성시킨다.

Wavenumber가 1037.5 cm⁻¹에서 나타난 Si-O-Si asymmetric bond의 피이크 강도는 열처리 온도가 증가함에 따라 증가함을 볼 수가 있고, Si-O-C bond (1102.5 cm⁻¹)의 피이크 강도는 감소함을 보였다. 그리고 Si-CH₃ (1270 cm⁻¹)와 CH_n (2970 cm⁻¹) bond들은 열처리 온도에 관계없이 일정한 피이크의 강도를 갖고 있다. 이러한 결과는 형성된 박막이 열처리 온도가 증가함에 따라 O-Si-CH₃와 O-Si-O bond들이 나노-기공을 가지면서 cross-linking-network 구조로 형성됨을 의미한다 [5]. H-OH stretching bond (3720 cm⁻¹)는 열처리 온도에 관계없이 피이크의 강도는 일정하다.

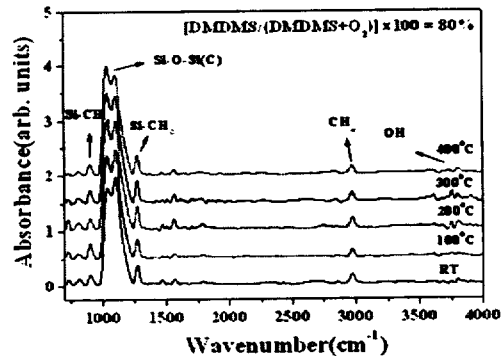


Fig. 1. FTIR spectra of the SiOC(-H) films prepared with various annealing temperatures for [DMDMS/(DMDMS +O₂)] flow rate ratio of 80%.

Fig. 2는 FTIR 스펙트럼에서 wavenumber

가 $960\text{ cm}^{-1}\sim 1235\text{ cm}^{-1}$ 영역을 가우시안 피이크로 분리를 하여 나타낸 것이다. 일반적으로 Si-O-C(-H) bond는 -ring link, -open link 그리고 -cage link의 3종류 성분 모드를 갖고 있다. 이 모드들은 SiOC(-H) 박막의 결합구조와 나노-기공 및 유전상수 변화에 영향을 주며 [10], Si-O-Si(C) bond의 FTIR 스펙트럼을 Gaussian peak fitting으로부터 분석할 수 있다. Wavenumber가 1023.8 cm^{-1} 부근에서 나타난 피이크는 Si-O-Si bond이고, wavenumber가 1056.7, 1103.8 그리고 1149.5 cm^{-1} 부근에서 나타난 피이크는 Si-O-C bond의 -ring link, -open link 그리고 -cage link 모드이다 [11]. 여기서 Si-O-Si bond와 Si-O-C bond의 -ring link 모드는 열처리 온도가 증가함에 따라 wavenumber

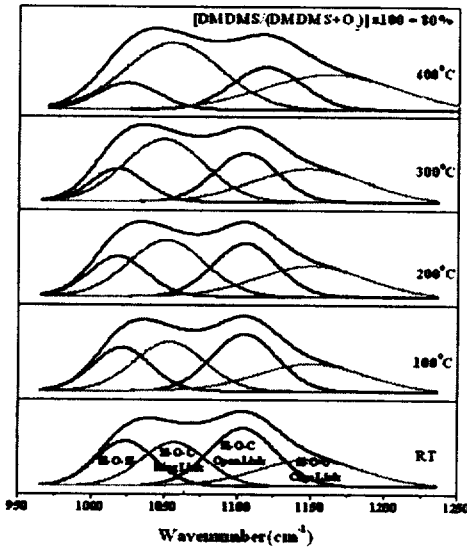


Fig. 2. Deconvolution of Si-O-C bonding mode in the wavenumber range from 960 cm^{-1} to 1235 cm^{-1} post annealing was done at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 30 min in Ar gas ambient.

가 낮은 영역으로 편이 (red shift) 됨을 보였고, Si-O-C bond의 -open link 모드는 wavenumber가 높은 영역으로 편이 (blue shift) 현상이 나타났다. 이것은 열처리 후의 SiOC(-H) 박막의 구조가 탄소와 산소 원자의 재배열됨을 의미하며, 이러한 재배열에 의해서 Si-O-Si bond의 -open link 모드의 구조가 -ring link 모드의 구조로 변화되는 것을 의미 한다. 이러한 결과는 SiOC(-H) 박막의 결합에서 Si-CH₃ 진동 모드에 관계되며, 또한 나노 기공 형성에 관계된다.

Fig. 3는 열처리 처리 온도에 따라 Si-O-C(-H) bond의 성분 모드의 상대적 면적비를 나타낸 것이다. 실온에 증착된 박막의 Si-O-C(-H) bond의 -ring link와 -cage link 모드의 상대적 면적비는 23.8%와 22.8%였으나 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 열처리한 경우에는 40.8%와 29.6%로 증가 하였다. 그러나 실온에 증착된 박막의 Si-O-Si bond와 Si-O-C(-H) bond의

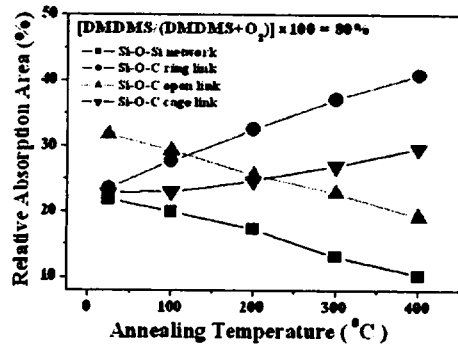


Fig. 3. Relative absorption areas of the Si-O-Si, Si-O-C ring link, Si-O-C open link and Si-O-C cage link mode of the SiOC(-H) films prepared with various annealing temperatures for [DMDMS/(DMDMS+O₂)] flow rate ratio of 80%.

-openg link 모드의 상대적 면적비는 21.8%와 31.7% 였으나 400 °C로 열처리한 경우에는 10.2%와 19.1%로 감소하였다. 이 결과는 Si-O-C ring link 모드는 열처리 온도가 증가 할수록 기공의 밀도가 증가하고, SiOC(-H) 박막이 구조적으로 안정성이 있음을 의미한다. 열처리 온도가 증가하면, 증착된 SiOC(-H) 박막 내부의 탄소 원자가 O-Si-O network 구조의 실리콘 원자와 결합하면서 Si-O-C ring link 구조가 증가하는 것이다. 이로 인해 SiOC(-H) 박막은 나노-기공이 형성과 유전상수를 감소시켜주는 것으로 생각된다 [12].

Fig. 4는 SiOC(-H) 박막의 열처리 온도에 따라 Si-O-C와 Si-O-Si bond의 결합각 변화를 나타내 것이다. 결합각은

$\nu = \nu_0 \left[\sin \frac{\theta}{2} \right]$ 을 이용하여 계산하였다. 여기서, θ 는 결합각 이고, ν_0 은 1135.6 cm^{-1} 로써 실리콘 열산화막의 wavenumber 이고, ν 은 SiOC(-H) 박막의 FTIR 스펙트럼에서 wavenumber 이다. 그림에서 보는 것처럼 Si-O-C bond에서의 결합각은 열처리 온도가 실온, 100 그리고 200 °C에서 152.8°, 153.2° 그리고 153.3°로 증가하였으나 300와 400 °C에서는 153.2°로 약간 감소하였다. Si-O-Si bond에서의 결합각은 열처리 온도가 실온과 100 °C에서 128.8°와 128.1° 이고, 200와 300 °C에서 124.4° 그리고 400 °C에서는 127.4°로 약간 감소하였다 [13,14]. 이것은 Fig. 6의 결과와 같이 열처리 한 후에는 Si-O-Si bond 모드의 wavenumber가 작아지는 쪽으로 이동한다. 증착 후 열처리 과정에서 열처리 온도가 커짐에 따라 Si-O-Si 결합에서 산소를 중심으로 그 사잇각이 조금씩 작아지고 있음

을 의미한다. 이것은 열처리 전에는 산소의 원소를 중심으로 단위구조에서의 분극률이 커지는 것을 의미하며, 열처리 후의 SiOC(-H) 박막은 산소 원소를 중심으로 한 단위구조에서 그 사잇각이 작아짐으로서 분극률을 감소시키는 결과를 가져온다. 이 결과로부터 Si-O-C(-H) 결합구조는 열처리 온도가 증가함에 따라 Si-O-Si 결합각 보다 Si-O-C 결합각이 증가로 인하여 나노-기공의 크기가 커지는 것이다. 왜냐 하면 O-Si-O bond에 결합된 -CH₃는 terminate 되기 때문에 chain network를 이루지 않고 빈자리만 가지면서 나노-기공이 형성되는 것이다. Si-O-C bond의 결합각이나 Si-O-Si bond 결합각이 열처리 온도가 증가함에 따라 작아지는 것은 Fig. 5의 결과처럼 형성된 SiOC(-H) 박막은 O-Si-CH₃와 O-Si-O bond들이 나노-기공을 가지면서 cross-linking-network 구조로 형성됨을 의미 한다.

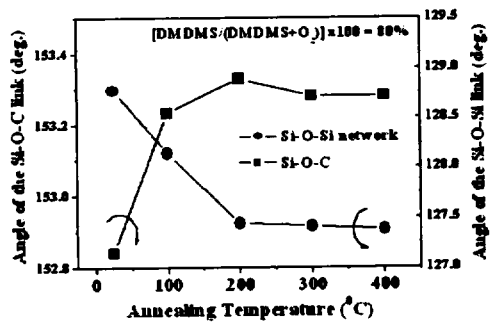


Fig. 4. Si-O-Si(C) bonding angle of SiOC(-H) films prepared with various annealing temperatures for [DMDMS/(DMDMS+O₂)] flow rate ratio of 80%.

Fig. 5은 Fig. 4의 결과로부터 열처리 온도에 따른 Si-O-C bond의 쌍극자 모멘트

(dipole moment)를 나타낸 것이다. 여기서 Si-O-C 결합의 쌍극자모멘트는

$$\mu_{Si-O-C} = \sqrt{(\mu_{Si-C})^2 + (\mu_{Si-O})^2 - 2(\mu_{Si-O})(\mu_{Si-C})\cos\theta}$$

식으로부터 계산할 수 있다 [15]. 여기서

μ_{Si-O} 와 μ_{Si-C} 는 각각 Si-C와 μ_{Si-C}

과 Si-O bond의 쌍극자 모멘트로서는 $2.5 \times 10^{-30} C \cdot m$ 이고, μ_{Si-O} 은 $2.0 \times 10^{-30} C \cdot m$ 이고, θ 는 Si-C와 Si-O bond 사이의 결합각이다. 실온에서의 쌍극자 모멘트는 $1.164 \times 10^{-30} C \cdot m$ 였으나 열처리 온도가 100 °C에서는 $1.151 \times 10^{-30} C \cdot m$ 로 급격히 감소하였고, 200 °C로 열처리한 경우에는 $1.148 \times 10^{-30} C \cdot m$ 로 약간 감소하였다. 그러나 열처리 온도를 300와 400 °C로 한 경우에는 $1.150 \times 10^{-30} C \cdot m$ 로 약간 증가하였다. 이와 같은 현상은 SiOC(-H) 박막에서 열처리 온도가 증가하면 박막내부에 -CH₃ group이 증가하고, -CH_n이 O-Si-O bond와 결합되면서 Si-O-C bond는 산소와 탄소 원자의 반발력으로 인하여 Si-O-C bond의 사잇각이 커지기 때

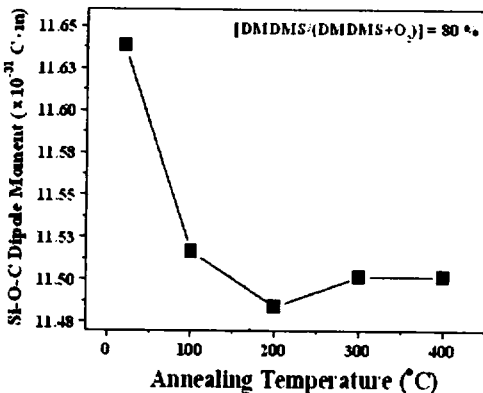


Fig. 5. diopole moment of SiOC(-H) films prepared with various annealing temperatures for [DMDMS/(DMDMS +O₂)] flow rate ratio of 80%.

문이다. 따라서 Si-O-C bond의 결합각이 커지면 쌍극자 모멘트는 작아지고 박막내부에 나노-기공의 함유량이 증가하여 유전 상수를 감소시키게 한다. 이러한 쌍극자 모멘트의 변화는 증착된 SiOC(-H) 박막내부의 탄소 원소와 산소 원소의 전기음성도 (electronegativity)의 차이에 의해서 생겨난다 [15,16].

Fig. 6은 실온에서 증착한 SiOC(-H) 박막을 100, 200, 300 그리고 400 °C로 열처리된 박막의 기공 밀도 나타낸 것이다. 여기서

기공율은 식 $f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_{eff}}{\epsilon_a + \epsilon_{eff}} + (1 - f_a) \frac{\epsilon_b - \epsilon_{eff}}{\epsilon_b + \epsilon_{eff}} = 0$ 를

이용하여 계산하였다. 실온에서 증착한 시료의 기공율은 42.06%이고, 열처리 온도가 100, 200, 300 그리고 400 °C로 열처리한 경우에는 43.86, 46.91, 48.46 그리고 49.72%로 증가하였다. SiOC(-H) 박막은 Si-O-Si chain network에 -CH₃ groups에 의해 Si-O-C구조를 형성하는데 여기서 -CH₃ group들은 Si-O-Si chain network을 깨어 O-Si-CH₃ bond로 결합되고, O-Si-O bond와 결합하여 Si-O-C(-H) bond로 network 된다. 여기서 O-Si-CH₃ bond에서 -CH₃ group은 다른 bond와 결합되지 않고 terminate되어 전체 Si-O-C(-H) chain network 구조에서 나노-기공을 형성하게 된다. 이러한 열처리 온도가 증가 할수록 탄소와 수소로 인해 Si-O₄ bond는 감소되고, Si-C₃-O와 Si-C-O₃ bond의 증가의 결과로 확인 할 수 있었으며, FTIR 결과에서도 Si-O-Si bond와 Si-O-C bond의 증첩 스펙트럼과 Si-O-Si bond와 Si-O-C bond의 open link mode가 감소하는 대신 Si-O-C bond의 -ring link와 -cage link

mode가 증가함의 결과와 일치한다.

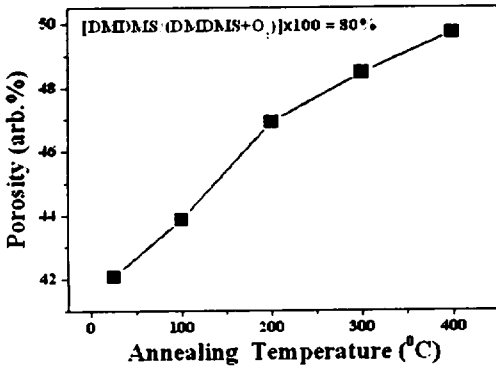


Fig. 6. The porosity of SiOC(-H) films prepared with various annealing temperatures for [DMDMS/(DMDMS +O₂)] flow rate ratio 80%.

Fig. 7은 실온에서 증착한 SiOC(-H) 박막을 100, 200, 300 그리고 400 °C로 열처리 된 SiOC(-H) 박막의 유전상수와 굴절률을 나타 낸 것이다. 실온에서 증착된 유전상수는 2.43로 측정 되었고, 열처리 온도가 100, 200, 300 그리고 400 °C 일 때에는 2.37, 2.27, 2.22 그리고 2.18로 감소되었다. 열처리 온도에 따라 유전상수가 감소하는 것은 Fig. 6의 결과와 같이 SiOC(-H) 박막내부에 나노-기공이 형성되며, 그 기공 율은 열처리온도에 의존하기 때문이다. 열처리 온도에 따른 SiOC(-H) 박막의 굴절률은 유전상수의 변화는 동일한 경향을 보이고 있다. 실온에서 증착된 SiOC(-H) 박막의 굴절율은 1.44였으나, 열처리 온도가 100, 200, 300 그리고 400 °C인 시료에서는 1.44, 1.43, 1.43 그리고 1.42로 감소하였다.

Fig. 8은 SiOC(-H) 박막의 기공 율에 따른 누설전류밀도를 측정 한 것이다. 여기서 누설전류는 MIS 구조에서 측정된 I-V 특성 곡선에서 3 V 인가전압에서 측정 한 것이다.

박막의 기공 율이 42.04%에서의 누설전류밀도는 3.20×10^{-9} A/cm² 였으나, 기공 율이 43.86, 46.91, 48.46 그리고 49.72%에서는 박막의 누설전류 밀도는 3.77×10^{-9} , 3.89×10^{-9} , 1.49×10^{-8} 그리고 5.55×10^{-8} A/cm²로 증가하였다. 기공 율이 증가할 수록 박막의 누설전류가 증가하는 것은 박막이 치밀하지 못하기 때문이다. 일반적으로 SiOC(-H) 박막의 치밀도는 기공 율에 의존하고, 기공율이 높으면 기계적 특성이 우수하지 못하다 [17].

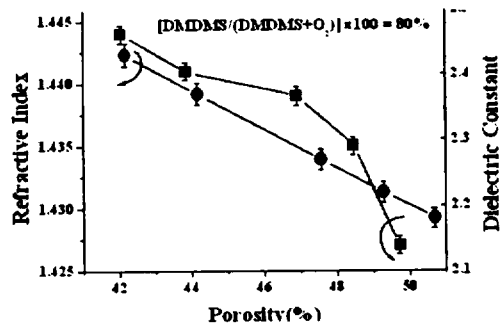


Fig. 7. Dielectric constant and Refractive index of SiOC(-H) films prepared with various porosities for [DMDMS/(DMDMS+O₂)] flow rate ratio 80%.

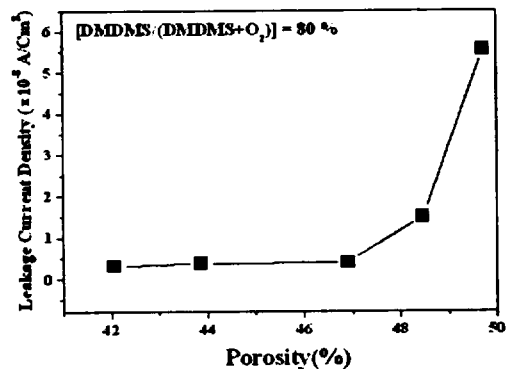


Fig. 8. Leakage current density of SiOC(-H) films prepared with various porosities.

4. 결 론

50 nm급 Cu/Low-k 소자에 적용하기 위하여 DMDMS와 oxygen precursor를 이용하여 UV-source assisted PECVD방법으로 SiOC(-H) 박막을 형성하였다. 실온에서 형성된 SiOC(-H)박막은 열처리 온도가 증가 할수록 Si-O-C(-H) bond의 -ring link와 -cage link mode의 농도는 증가하고, Si-O-C(-H) bond의 -open link mode와 Si-O-Si bond의 농도는 감소한다. 이것은 열처리 후의 SiOC(-H) 박막의 구조가 탄소와 산소 원자의 재배열됨을 의미하며, 이러한 재배열에 의해서 Si-O-Si chain network 구조가 Si-O-C(-H) bond 구조로 변화되는 것을 나타낸다. 열처리 온도가 증가하면, 증착된 SiOC(-H)박막 내부의 탄소 원자가 O-Si-O network 구조의 Si 원자와 결합하면서 성분이 Si-O-C(-H) bond의 -ring link와 -cage link mode가 증가하는 것이다. 이로 인해 나노-기공이 형성될 수 있고, 열처리 온도가 증가 할수록 유전상수는 감소하게 된다. 나노 기공 구조를 갖는 SiOC(-H)박막의 기공율은 브루그만 유효매질 이론을 이용하여 계산하면 실온에서는 42.06%이고 400 °C로 열처리하면 49.72%로 증가한다. 이것은 O-Si-O와 결합한 -CH_n 그룹이 열처리 이후에 나노-기공을 형성하게 함으로서 기공율이 증가하는 것이다. 400 °C로 열처리한 SiOC(-H) 박막의 I-V 특성으로부터 누설전류밀도는 약 5.55×10^{-8} A/cm²로 측정되었다 이는 박막내의 기공의 형성으로 박막의 밀도가 감소하는 것이고, C-V 특성으로부터 유전상수는 2.18이 되었다.

참고문헌

- [1] M. R. Baklanov and K. Maex, Phil. Trans. R. Soc. A 364 201-215 (2006).
- [2] M. Morgen, E. Todd, J. H. Zhao, C. Hu, T. Cho, P. S. Ho, Annu. Rev. Mater. Sci., 30. 645-680 (2000).
- [3] L. L. Chapelon, V. Arnal, M. Broekaart, L. G. Gosset, J. Vitiello, J. Torres, Microelectronic Engineering, 76, 1-7 (2004).
- [4] G. Maier, Prog. Polym. Sci. 26, 4 (2001).
- [5] C. S. Yang and C. K. Choi, Curr. Appl. Phys, 6, 243247 (2006).
- [6] T. Homma, Materials Science and Engineering, R. 23, 243(1998).
- [7] I. Webman, J. Jorner and M.H. Cohen, Phys. Rev, B13, 713, 1976.
- [8] 이병택, 페라이트 복합재료의 전자기 특성 및 액정 폴리머 복합재료의 유전이완과 동역학적 이완, 박사학위 논문, 한국과학기술원, 대전, 1995.
- [9] W. W. Hansen, Phys. Rev. 47, 139, 1935.
- [10] K. Maex, M. R. Baklanov, D. Shamiryan and F. Lacopi, S. H. Brongersma and Z. S. Yanovitskaya, J. Appl. Phys, 93(11) 8793-8841 (2003)
- [11] A. Grill and V. Patel, Appl. Phys. Lett, 79(6) 803-805 (2001).
- [12] A. Grill, D. A. Neumayer, J. Appl. Phys, 94 6697-6707 (2003).
- [13] Y. H. Kim, M. S. Hwang, H. J. Kim, J.

- Y. Kim and Y. Lee, *J. Appl. Phys.*, **90**(7), 3367-3370 (2001).
- [14] G. Lucovsky, M. J. Manitini, J. K. Srivastava and E. A. Irene, *J. Vac. Sci. Technol. B* **5**(2) (1987).
- [15] Y. H. Kim, S. K. Lee and H. J. Kim, *J. Vac. Sci. Technol. A* **18**(4) (2000).
- [16] C. Guedj, G. Imbert, E. Martinez, C. Licitra, N. Rochat and V. Arnal, *Microelectronics Reliability*, **47**, 764-768, (2007).
- [17] J. Xu, C. S. Yang and C. K. Choi, *J. Kor. Phys. Soc.*, **45**, 175-179 (2004).