

Ni/CNT/SiO₂ 구조의 4H-SiC MIS 캐패시터의 전기적 특성

Electrical characteristics of 4H-SiC MIS Capacitors With Ni/CNT/SiO₂ Structure

이 태 섭*, 구 상 모**

Taeseop Lee*, Sang-Mo Koo**

Abstract

In this study, the electrical characteristics of Ni/CNT/SiO₂ structures were investigated in order to analyze the mechanism of carbon nanotubes in 4H-SiC MIS device structures. We fabricated 4H-SiC MIS capacitors with or without carbon nanotubes. Carbon nanotubes were dispersed by isopropyl alcohol. The capacitance-voltage (C-V) is characterized at 300 to 500K. The experimental flat-band voltage (V_{FB}) shift was positive. Near-interface trapped charge density and oxide trapped charge density values of Ni/CNT/SiO₂ structure were less than values of reference samples. With increasing temperature, the flat-band voltage was negative. It has been found that its oxide quality is related to charge carriers or defect states in the interface of 4H-SiC MIS capacitors. Gate characteristics of 4H-SiC MIS capacitors can be controlled by carbon nanotubes between Ni and SiO₂.

요 약

본 연구에서는, Ni/CNT/SiO₂ 구조의 4H-SiC MIS 캐패시터를 제작하고 전기적 특성을 조사하였다. 이를 통하여 4H-SiC MIS 소자에서 탄소나노튜브의 역할을 분석하고자 하였다. 탄소나노튜브는 이소프로필알코올과 혼합하여 SiO₂ 표면에 분산하였다. 소자의 전기적 특성 분석을 위하여 300-500K의 온도 범위에서 소자의 정전용량-전압 특성을 측정하였다. 밴드 평탄화 전압은 양의 방향으로 shift되었다. 정전용량-전압 그래프로부터 계면 포획 전하 밀도 및 산화막 포획 전하 밀도가 유도되었다. 산화막의 상태는 4H-SiC MIS 구조의 계면에서 전하 반송자 또는 결합 상태와 관련된다. 온도가 증가함에 따라 밴드 평탄화 전압은 음의 방향으로 shift되는 결과를 얻었다. 실험 결과로부터, Ni과 SiO₂ 계면에 탄소나노튜브를 첨가함에 따라 4H-SiC MIS 캐패시터의 게이트 특성을 조절 가능할 것으로 판단된다.

Key words : 4H-SiC, carbon nanotube, MIS capacitor, high temperature, C-V

* Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

★ Corresponding author

smkoo@kw.ac.kr, 02-940-5763

※ Acknowledgment: This research was supported by a grant from the Fundamental R&D Program for "Ultra high purity SiC material" funded by the Ministry of Knowledge Economy, Republic of Korea, by the National Research Foundation of the Korea Grant funded by the Korean Government and by a Research Grant from Kwangwoon University in 2014.

Manuscript received Oct. 22, 2014; revised Dec. 9, 2014 ; accepted Dec. 10, 2014

I. 서론

최근에 전력 반도체 소자로 많이 사용되고 있는 실리콘은 낮은 절연과피 특성, 낮은 열전도율 등의 재료적 특성의 한계로 인하여 전력 손실이 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 소자의 전력 손실을 최소화하기 위하여 고에너지갭 (wide band gap) 재료를 이용하여 문제를 해결할 수 있다. 고에너지갭 재료들은 강안 공유결합을 하고 있어 격자 산란 (photon scattering)이 적기 때문에 높은 열전도율을 가지며, 고온 환경 및 기타 혹독한 환경에서도 동작 가능하다 [1]. 본 연구에서는 다른 고에너지갭 반도체들과 비교하여 여러 장점을 가지고 있는 SiC에 초점을 맞추었다. 특히 4H-SiC는 여러 가지 폴리타입 (polytype) 중에서 전자 이동도 (electron mobility)가 높은 장점을 가지고 있으므로 전력 반도체 소자 제조에 선호된다 [2].

4H-SiC는 3.26 eV의 넓은 에너지 밴드 갭을 가지고 있으며, Si과 C의 결합 에너지가 높기 때문에 물리, 화학적으로 안정적이다. 또한, 4H-SiC는 다른 고에너지 밴드갭 반도체에 비하여 건식/습식 산화공정 (dry/wet oxidation)을 통한 열산화막을 쉽게 형성시킬 수 있다. 그리고, 기존 실리콘 기반의 공정 기술의 대부분을 SiC의 공정에 적용 가능하다. 이는 SiC가 기존 반도체 응용분야를 대체할 차세대 재료임을 의미한다. 하지만, SiC의 열산화막은 높은 계면 포획 전하 밀도 (interface trap charge density, $\sim 10^{12}$

$\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$)로 인하여 벌크 이동도 (bulk mobility)와 비교해 낮은 채널 이동도 (channel mobility)를 가지고 있어, 전력 반도체 소자에 적용할 때, 신뢰성이 떨어지는 것으로 알려져 있다 [1]. 이러한 문제점들을 탄소나노튜브 (carbon nanotube)를 이용하여 극복하고자 하였다.

탄소나노튜브는 우수한 저장 용량, 물리·화학적 안정성, 높은 전도성, 그리고 높은 내열성을 가지고 있다. 최근에 탄소나노튜브 채널 소자 (CNT channeled device)와 중합체 (polymer), 금속 (metal), 세라믹 (ceramic)과의 탄소나노튜브 혼합물 (composite) 등의 분야에서 연구가 활발하게 진행되고 있다 [3].

본 연구에서는 4H-SiC 기판 위에 이산화규소 (SiO_2) 열산화막을 1200°C의 고온에서 성장시켰으며, 열산화막과 금속의 계면에 탄소나노튜브를 분산 (dispersion)하였다. 제작한 소자의 온도에 따른 전기적 특성을 분석하여, 탄소나노튜브를 이용한 4H-SiC MIS 소자의 고온 등 극한환경에서 응용가능성을 평가하고자 하였다.

II. 본론

1. 실험 방법

n-type 4H-SiC 기판을 이용하여 탄소나노튜브가 첨가된 MIS capacitor와 첨가하지 않은 소자를 제작하여 비교·분석하였다. 4H-SiC 기판을 1200°C에서 1시간 동안 O_2 환경에서 열산화하여 SiO_2 를 성장시켰다. 이후, $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ 기판의 금속/산화막 계면에 탄소나노튜브를 분산하기 위한 공정을 진행하였다. 친수성을 가진 이소프로필알코올 (isopropyl alcohol, $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$)과 탄소나노튜브를 혼합하여 SiO_2 표면에 분산하였다 [4]. 그 후, hot plate를 이용하여 탄소나노튜브가 첨가된 $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ 기판을 120°C로 10분간 어닐링 (annealing)하였다. 그 결과, 용매는 기화하였으며, SiO_2 표면에 탄소나노튜브가 분산되었다. 분산 공정 후, 전자빔 증발기 (e-beam evaporator)를 이용하여 상·하부 전극을 형성하였다. 상부 전극은 새도우 마스크 (shadow mask)를 이용하여 100 nm 두께와 0.4-1.0 μm 지름의 니켈 (Nickel, Ni)을 패터닝하였다. 그리고 하부 전극은 100 nm 두께의 알루미늄 (Aluminum, Al)을 형성하였다. 제작된 샘플들의 단면 구조를 그림 1에 나타내었다. 제작된 샘플들은 Keithley 4200 SCS를 이용하여 300K에서 500K로 온도를 증가시키며 정전용량-전압 (C-V) 측정을 진행하였다. 온도의 증가에 따른 C-V와 flatband voltage shift로부터 계면 포획 전하 밀도 (near-interface trap charge density, N_{it})와 산화막 포획 전하 밀도 (oxide trap charge density, N_{ot})가 유도되었다.

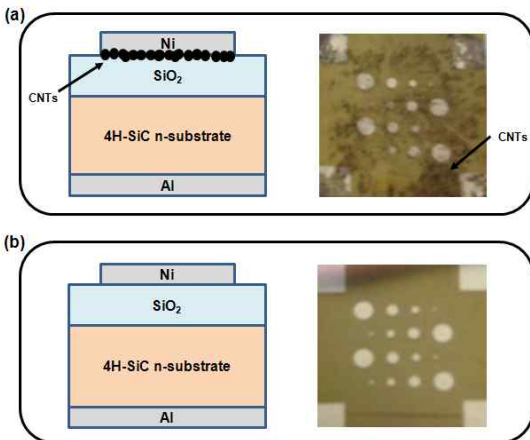


Fig. 1. Schematic device structures and optical images for 4H-SiC MIS capacitor with(a) or without(b) CNTs

그림 1. 탄소나노튜브를 첨가한 4H-SiC MIS 캐패시터와 참조 샘플의 단면도 및 광학 이미지

2. 결과 및 고찰

그림 2는 상온 (300K)에서 탄소나노튜브를 첨가한 4H-SiC MIS 캐패시터 (CNT device)와 참조 샘플 (Ref.)의 C-V 측정 결과이다. C-V 특성은 1MHz의 고주파에서 전압을 왕복하여 측정하였다. 두 샘플의 그래프에서 모두 hysteresis 현상이 나타남을 알 수 있는데, 이는 탄소나노튜브와 열산화막에 축적된 전하 캐리어 (charge carrier)에 기인한다. 또한, 계면에

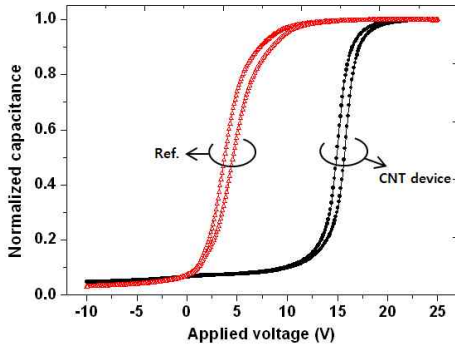


Fig. 2. High frequency (1MHz) capacitance-voltage curves for 4H-SiC MIS capacitor with or without CNTs

그림 2. 고주파 (1MHz)에서 측정한 CNT를 첨가한 4H-SiC MIS 캐패시터와 참조 샘플의 정전용량-전압 그래프

서 결함 상태 (defect states)의 산화막 포획 전하와 계면 포획 전하에 의하여 hysteresis가 발생할 수 있다. 이러한 hysteresis 현상으로 나타난 전압 차이 (V_{hys})를 이용하여 계면 포획 전하 밀도와 산화막 포획 전하 밀도를 추출하였다. 이는 아래의 식을 이용하여 계산이 가능하다 [5, 6].

$$N_{it} = \frac{C_{ox}|V_{hys}|}{qA} \quad (1)$$

$$N_{ot} = \frac{-C_{ox}V_{hys}}{qA} \quad (2)$$

탄소나노튜브를 첨가한 4H-SiC MIS 캐패시터와 참조 샘플의 계면 포획 전하 밀도는 각각 $1.89 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 와 $2.86 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 로 나타났으며, 각 샘플의 산화막 포획 전하 밀도는 $-1.89 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 와 $-2.86 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 로 분석되었다 (그림 3).

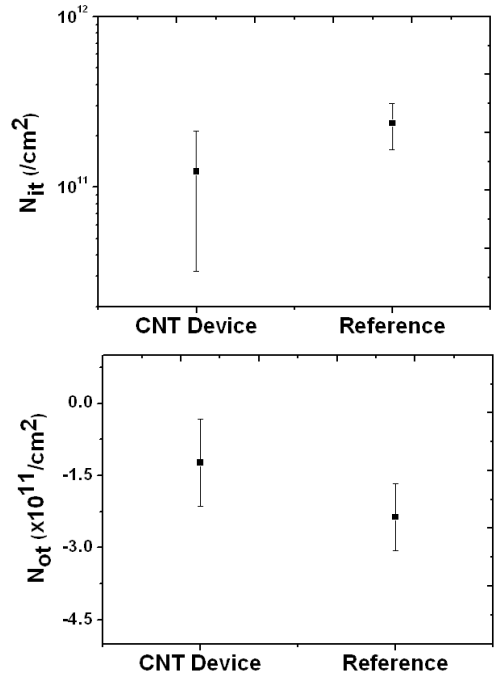


Fig. 3. Near-interface trapped charge density and oxide trapped charge density of 4H-SiC MIS capacitors with or without CNTs

그림 3. CNT를 첨가한 4H-SiC MIS capacitor와 참조 샘플의 계면 포획 전하 밀도와 산화막 포획 전하 밀도

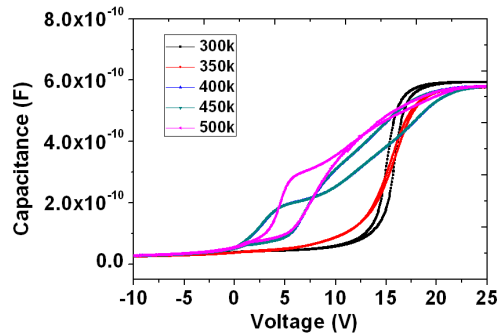


Fig. 4. High frequency (1MHz) capacitance-voltage curves for 4H-SiC MIS capacitor with CNTs at 300-500K.

그림 4. 300-500K의 온도 범위 및 고주파 (1MHz)에서 측정한 CNT를 첨가한 4H-SiC MIS 캐패시터의 정전용량-전압 그래프

계면 포획 전하와 산화막 포획 전하는 탄소나노튜브를 첨가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 그림 3은 1MHz의 주파수에서 온도를 300K부터 500K까지 증가시키며 측정한 C-V 그래프이다. 그림 4의 결과에서 온도가 증가함에 따라 계면과 산화막의 포획 전하 밀도에 기인하여 밴드 평탄화 전압 (flat-band voltage, V_{FB})이 shift됨을 알 수 있다. 탄소나노튜브를 게이트와 산화막 계면에 첨가함으로써, MIS 소자의 밴드 평탄화 전압이 증가 및 감소함을 분석하였다. 위의 결과들로부터, SiC 기반 소자의 열산화로 인한 산화막 품질이 개선되었음을 의미한다. 또한, 탄소나노튜브 첨가 및 온도 증가에 따라 MIS 소자의 문턱전압 (threshold voltage, V_{th})을 조절 가능할 것으로 판단된다.

III 결론

탄소나노튜브가 첨가된 4H-SiC MIS 캐패시터를 제작하여 온도에 따른 전기적 특성을 분석하였다. 샘플은 n-type 4H-SiC 웨이퍼를 사용하여 제작하였다. 정전용량-전압 (C-V) 측정과 밴드 평탄화 전압 shift로부터 탄소나노튜브를 첨가한 소자들의 계면 포획 전하 밀도 (near-interface trap charge density)와 산화막 포획 전하 밀도 (oxide trap charge density)가 참조 샘플의 값보다 감소된 값을 나타내었다. 또한, 측정 온도를 300-500K 범위로 증가시킨 결과, 밴드 평탄화 전압이 음의 방향으로 shift되는 결과를 얻었다. 탄소나노튜브를 게이트와 산화막 계면에 첨가함으로써, MIS 소자의 밴드 평탄화 전압이 증가 및 감소함을 분석하였다. 위의 결과들로부터, 탄소나노튜브 첨가 및 온도 증가에 따라 MIS 소자의 문턱전압 (threshold voltage, V_{th})을 조절 가능할 것으로 판단된다. 탄소나노튜브를 첨가한 4H-SiC MIS 캐패시터는 산화막 품질 측면과 게이트 특성을 조절 가능함으로써 MIS 소자에 응용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Wataru Norimatsu and Michiko Kusunoki, *Physical review B*, **81**, 161410 (2010).
- [2] G. Y. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams, K. McDonald, R. K. Chanana, Robert A. Weller, S. T. Pantelides, Leonard C. Feldman, O. W. Holland, M. K. Das, and John W. Palmour, *IEEE Electron Device*

Letters, **Vol. 22**, No. 4, p. 176 (2011).

- [3] P. J. F. Harris, *International Materials Reviews*, **Vol. 49**, Issue 1, pp. 31-43 (2004).
- [4] T. Suni, K. Henttinen, I. Suni, and J. Makinen, *Journal of The Electrochemical Society*, **149** (6) G349 (2002)
- [5] Jeong Hyun Moon, Wook Bahng, In Ho Kang, Sang Cheol Kim, Moon Geong Na and Nam-Kyun Kim, *Journal of the Korean physical society*, **Vol. 62**, No. 9, pp. 1363-1369 (2014)
- [6] Dieter K. Schroder, *Semiconductor material device characterization*, 3rd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1982) p. 338

BIOGRAPHY

Taeseop Lee (Student Member)



2014 : BS degree in Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.
2014~ : MS degree in Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.

Sang-Mo Koo (Member)

1997 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.

1999 : Tek. Licentiate in Engineering Materials Physics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

2003 : Ph.D. degree in Electronics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

1999 : Visiting Researcher, MIT, Cambridge, MA, USA

1999~2003 : Doktorand, KTH, Stockholm, Sweden

2003~2005 : Research Scientist, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA

2006~2009 : Assistant Professor, Kwangwoon University.

2009~2013 : Associate Professor, Kwangwoon University.

2012 : Visiting Professor, KTH, Stockholm, Sweden

2013 : ~Professor, Kwangwoon University.