In-situ 도핑된 M/NEMS용 다결정 3C-SiC 박막의 특성

김강산 · 정귀상[†]

Characteristics of in-situ doped polycrystalline 3C-SiC thin films for M/NEMS applications

Kang-San Kim and Gwi-yang Chung[†]

Abstract

This paper describes the electrical properties of poly (polycrystalline) 3C-SiC thin films with different nitrogen doping concentrations. In-situ doped poly 3C-SiC thin films were deposited by APCVD at 1200 °C using HMDS (hexamethyldisilane: $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$) as Si and C precursor, and 0~100 sccm N_2 as the dopant source gas. The peak of SiC is appeared in poly 3C-SiC thin films grown on SiO_2/Si substrates in XRD(X-ray diffraction) and FT-IR(Fourier transform infrared spectroscopy) analyses. The resistivity of poly 3C-SiC thin films decreased from 8.35 $\Omega\cdot\text{cm}$ with N_2 of 0 sccm to 0.014 $\Omega\cdot\text{cm}$ with 100 sccm. The carrier concentration of poly 3C-SiC films increased with doping from 3.0819×10^{17} to $2.2994 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and their electronic mobilities increased from 2.433 to 29.299 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$, respectively.

Key Words : Poly 3C-SiC, M(N)EMS, in-situ doping

1. 서 론

최근 급속히 발전하고 있는 Si-M(N)EMS는 Si의 1.1 eV의 낮은 밴드갭으로 인해 100 °C 전후 그리고 SOS(Si on sapphire)와 SOI(Si on Insulator) 구조의 경우는 300 °C까지 사용이 가능하지만, 집적화된 M(N) EMS의 높은 발열문제를 극복하기에는 그 한계가 있다^[1]. 이러한 Si-M(N)EMS의 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 우수한 물리적, 전기적, 기계적, 화학적, 광학적 특성뿐만 아니라 Si 미세표면가공기술을 이용할 수 있는 SiC-M(N)EMS에 대한 관심이 증대되고 있다^[2]. SiC는 Si에 비해 밴드갭이 2~3배 이상 높고 열전도도가 3배 가량 뛰어나 높은 한계 온도를 가지며 화학적 안정성과 내부식성, 내산화성이 매우 양호하기 때문에 극한 환경에서도 사용이 가능하다^[3]. 또한, 3C-SiC는 벌크형태로 성장되는 4H- 혹은 6H-SiC와는 달리, Si기판 혹은 절연막 위에 이중결정성장할 수 있다. 이러한 이중

결정성장의 구조는 박막의 두께 제어가 쉽고 기판의 식각을 통한 3C-SiC 미세구조물 제작이 용이하며 박막의 뛰어난 기계적 특성으로 인해 마이크로/나노 캔틸레버 및 공진기 등의 바이오 및 RF용 M(N)EMS 연구가 활발히 진행되고 있다^[4].

그러나, SiC-M(N)EMS에 응용할 때 감도, 분해능, 응답속도 등은 감지 물질의 전기적 특성에 매우 크게 영향을 받기 때문에 유전상수, 비저항, 주파수특성, 전자 이동도, 캐리어 농도 그리고 TCR(temperature coefficient resistivity) 등과 같은 재료의 전기적, 열적 특성 분석이 필수적이다^[5].

따라서, 본 연구에서는 *in-situ* 도핑에 따라 다결정 3C-SiC 박막을 성장하여 XRD, FT-IR로 각각의 물리적 특성을 평가했으며 또한, 전기적 특성인 전자 이동도와 캐리어 농도를 분석했다.

2. 실험

그림 1은 다결정 3C-SiC 결정성장을 위한 유량과 온도제어 프로파일이다. 본 연구에서는 산화막이 증착된 Si(100)기판위에 다결정 3C-SiC를 성장했으며 고순도

울산대학교 전기전자정보시스템공학부(School of Electrical Eng., University of Ulsan)

[†]Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr
(Received : March 21, 2008, Revised : April 30, 2008
Accepted : May 22, 2008)

그림 1. 다결정 3C-SiC 결정성장을 위한 온도제어 프로파일
Fig. 1. Temperature control profile for poly 3C-SiC thin film epitaxial growth.

아르곤을 캐리어가스로 사용하여 성장온도까지 가열후 HMDS 전구체를 주입하였다^[6,11]. 전구체 주입 전후에 온도의 안정과 잔여 전구체의 배기를 위해 각각 holding 시간을 두었다. 전구체의 반응성을 높이기 위해 고 순도의 H_2 를 주입했으며 가스의 유량은 각각 Ar: 5 slm, H_2 : 1 slm, HMDS: 1 sccm이었다. 1200 °C에서 30 분 동안 성장했으며 다결정 3C-SiC 박막의 도핑량 제어를 위한 N_2 의 주입유량은 0~100 sccm 범위에서 제어했다.

한편, 본 연구에서는 N_2 *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 전기적 특성을 분석하기 위해 박막표면에 4개의 백금 전극을 증착하고 400 °C에서 열처리 후, 상온에서 0.51 T의 자계를 인가하여 홀 효과를 측정했다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 SEM 이미지이다. SiO_2 의 두께와 다결정 3C-SiC 박막의 두께는 각각 400, 250 nm였으며 증착온도에 따른 Si 및 SiO_2 층의 손상은 없는 것을 확인했다^[7].

그림 3은 Ar+HMDS+ H_2 + N_2 가스를 이용하여 0~100 sccm *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 XRD 스펙트럼 변화를 나타낸 것이다. $2\theta = 36.5^\circ$ 에서 SiC(111)면의 피크가 관찰되어 다결정 3C-SiC 박막이 정상적으로 성장됨을 확인했다^[8,9]. 그러나, N_2 유량이 증가할수록 SiC(111)의 피크는 감소하는데 이것은 도핑농도가 100 sccm일 때 정상적인 SiC 격자 구조를 형성하지 못함을 알 수 있다. 이러한 원인은 N 원자의 영향으로 인한 스트레인의 증가로 추측된다. 도핑량의 증가에 따른 스트레인의 변화는 $-2 \times 10^{-4} \sim -5 \times 10^{-4} \text{ um}^{-1}$ 로 증가하는 것으로 보고되었다^[5].

그림 2. SiO_2/Si 기판위에 증착된 다결정 3C-SiC 박막의 SEM 이미지
Fig. 2. SEM image of poly 3C-SiC thin films deposited on SiO_2/Si substrates.

그림 3. N_2 *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 XRD 스펙트럼
Fig. 3. XRD spectra of the poly 3C-SiC thin films according to N_2 *in-situ* doping ratio.

그림 4. N_2 *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 FT-IR 스펙트럼
Fig. 4. FT-IR spectra of the poly 3C-SiC thin films according to N_2 *in-situ* doping ratio.

그림 4는 0~100 sccm *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 FT-IR 피크를 나타낸 것이다. FT-IR 피크 또한, XRD와 유사하게 도핑에 따른 물리

그림 5. N₂ *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 비저항 변화

Fig. 5. Variations of the resistivity of poly 3C-SiC thin films according to N₂ *in-situ* doping ratio.

적 변화를 보였다. N₂의 유량이 0 sccm일 경우, 3C-SiC 고유의 파수인 790 cm⁻¹에서 피크가 나타났으나 N₂의 유량이 증가할수록 높은 대역의 파수로 피크 이동을 확인했다. 이것은 XRD의 결과와 마찬가지로 도핑에 사용된 N(0.70 Å) 원자의 공유결합 반지름이 C(0.77 Å)와 Si(1.17 Å)의 공유결합 반지름보다 작기 때문에 SiC 박막 내부에 대체결합에 의한 격자의 수축으로 사료된다^[5].

그림 5는 *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 비저항 변화를 나타낸 것으로 N₂의 주입량이 0 sccm일 경우, 비저항이 약 8.35 Ω·cm 였지만 N₂의 주입량이 증가할수록 비저항은 100 sccm에서 약 0.014 Ω·cm로까지 감소하였다. 한편, LPCVD로 1,3-disilabutane 전구체와 NH₃ *in-situ* 도핑으로 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 경우, 비저항값은 1000~0.05 Ω·cm까지 제어가 가능했다^[10].

그림 6. N₂ *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 캐리어농도와 전자이동도 변화

Fig. 6. Variations of carrier concentration and electronic mobility of poly 3C-SiC thin films grown with N₂ *in-situ* doping ratio.

그림 6은 *in-situ* 도핑량에 따라 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 캐리어의 농도변화와 전자이동도변화를 나타낸 것이다. N₂의 주입량이 증가할수록 캐리어 농도와 전자이동도가 증가함을 알 수 있다. 다결정 3C-SiC 박막의 캐리어농도는 30 sccm에서 포화되기 시작했으며 40~80 sccm에서는 큰 증가를 보이지 않았다. 또한, 100 sccm에서는 $2.2994 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 였다. 다결정 3C-SiC 박막의 전자이동도는 N₂의 유량 0 sccm에서 2.433 cm²/V·S로 측정되었으며 N₂ 유량의 증가에 따라 전자이동도 또한 증가했다. 그러나, 캐리어농도의 변화와 마찬가지로 20~30 sccm 범위에서 포화되어 큰 증가는 보이지 않았으며 100 sccm에서의 전자이동도는 약 29 cm²/V·S였다.

4. 결 론

본 연구에서는 M(N)EMS용으로 *in-situ* 도핑된 다결정 3C-SiC 박막의 물리적, 광학적 그리고 전기적 특성을 평가했다. XRD와 FT-IR을 통해 SiC의 결정성장을 확인했으며 도핑물질의 주입이 결정성에 주는 영향을 분석했다.

N₂ *in-situ* 도핑량에 따른 XRD의 피크감소 및 FT-IR의 피크이동은 다결정 3C-SiC 박막형성 과정에서 질소 원자가 탄소원자로 치환되어 SiC 격자상수를 감소시키는 현상이며 이것은 기계적 성질인 탄성계수와 경도에 도 영향을 줄 것으로 사료된다.

또한, 전기적 특성분석을 위해 N₂ *in-situ* 주입유량을 0~100 sccm으로 제어했으며 도핑에 따라 박막의 비저항은 8.35 Ω·cm에서 0.014 Ω·cm까지 감소했다. 이때 캐리어 농도는 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 에서 N₂의 유량에 따라 증가하였다. 그러나, N₂ *in-situ* 도핑량이 40 sccm일 때, 캐리어 농도는 약 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 에서 포화되었으며 100 sccm까지 큰 증가를 보이지 않았다. 전자이동도 또한 캐리어의 농도 변화와 유사하여, 초기 0 sccm의 N₂ *in-situ* 도핑량에서는 약 2.5 cm²/V·S로 측정되었으며 도핑량이 증가할수록 이동도 또한 증가했으나 20~30 sccm에서 20 cm²/V·S, 100 sccm에서는 29 cm²/V·S로 각각 측정되었다.

이러한 N₂ *in-situ* 도핑에 따른 다결정 3C-SiC 박막의 전기적 특성의 제어는 SiC 박막을 기반으로 하는 SiC-M(N)EMS의 감도, 분해능, 응답속도 등의 제어를 가능케 할 뿐 아니라 마이크로 공진기의 공진주파수 제어도 가능할 것으로 기대된다. 또한, SiC 박막은 인체에 직접적인 삽입에도 부작용이 없으며 Si에 비해 높은 기계적 특성 및 화학적 내성으로 인해 극한 환경,

바이오 및 RF용 M(N)EMS 분야에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지방기술혁신사업(B0009720)과 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-D00177).

참고 문헌

- [1] G. S. Chung and K. S. Kim, "Characteristics of polycrystalline 3C-SiC thin films grown for micro/nano electromechanical systems by using single-precursor hexamethyldisilane", *J. of the Korean Phys. Soc.*, vol. 51, pp. 1389-1394, 2007.
- [2] P. M. Sarro, "Silicon carbide as a new MEMS technology", *Sensors & Actuators A*, vol. 82, pp. 210-218, 2000.
- [3] Y. T. Yang, K. L. Ekin, X. M. H. Huang, L. M. Schiavone, M. L. Roukes, and M. Mehregany, "Monocrystalline silicon carbide nanoelectromechanical systems", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, pp. 165-167, 2001.
- [4] Mo Li, H. X. Tang, and M. L. Roukes, "Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high-frequency applications", *Nature Nanotech.*, vol. 2, pp. 114-120, 2007.
- [5] Z. Jingchun, C. Carraro, R. T. Howe, and R. Maboudiana, "Electrical, mechanical and metal contact properties of polycrystalline 3C-SiC films for MEMS in harsh environments", *Surface & Coatings Tech.*, vol. 201, pp. 8893-8898, 2007.
- [6] G. S. Chung and K. S. Kim, "Heteroepitaxial growth of single 3C-SiC thin-films on Si (100) substrates using a single-source precursor of hexamethyldisilane by APCVD", *Bulletin of the Korean Chemical Soc.*, vol. 28, pp. 533-537, 2007.
- [7] K. Teker, "Selective epitaxial growth of 3C-SiC on patterned Si using hexamethyldisilane by APCVD", *J. of Cryst., Growth*, vol. 257 pp. 245-254, 2003.
- [8] R. J. Jwanowski, K. Fronc, M. Heinone, and Paszkowics, "XPS and XRD study of crystalline 3C-SiC grown by sublimation", *J. Alloys & Compounds*, vol. 286, pp. 143-147, 1999.
- [9] B. J. Wijesundara, D. Gao, C. Carraro, R. T. Howe, and R. Maboudian, "Nitrogen doping of polycrystalline 3C-SiC films grown using 1, 3-disilabutane in a conventional LPCVD reactor", *J. of Crystal Growth*, vol. 259, pp. 18-25, 2003.
- [10] Z. Jingchun, R. T. Howe, and R. Maboudian, "Electrical characterization of n-type polycrystalline 3C-SiC carbide thin films deposited by 1, 3-disilabutane", *J. the Electrochem. Soc.*, vol. 153, pp. G548-G551, 2006.
- [11] G. S. Chung, K. S. Kim, and J. W. Lee, "Characteristics of polycrystalline 3C-SiC thin films grown on AlN buffer layer for M/NEMS applications", *J. of the Korean Sensors Soc.*, vol. 6, pp. 457-461, 2007.

정 귀 상(Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 Toyahash Univ. of Tech (공학박사)
- 1993년 2월 ETRI 선임연구원
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : SOI, SiC, AlN, ZnO-M/NEMS

김 강 산(Kang-San Kim)

- 2008년 2월 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(공학석사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기전자정보시스템공학부 박사과정
- 주관심분야 : SiC-M/NEMS