ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 23-04-26
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.27,No.4,556~560,December 2023
https : //doi.org/10.7471/ikeee.2023.27.4.556
189

N-이온주입이 4H-SiC SBDs의 깊은 준위 결함 및 소수 캐리어 수명에 미치는 영향

The Impact of N-Ion Implantation on Deep-Level Defects and Carrier Lifetime in 4H-SiC SBDs

신 명 철[1], 이 건 희[1], 강 예 환[1], 오 종 민[1], 신 원 호[1], 구 상 모[1]★

Myeong-cheol Shin[1], Geon-Hee Lee[1], Ye-Hwan Kang[1], Jong-Min Oh[1], Weon Ho Shin[1], San-Mo Koo[1]★

Abstract

In this study, the impact of Nitrogen implantation process on deep-level defects and lifetime in 4H-SiC Epi surfaces was comparatively analyzed. Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) and Time Resolved Photoluminescence (TR-PL) were employed to measure deep-level defects and carrier lifetime. As-grown Schottky Barrier Diodes (SBDs) exhibited energy levels at 0.16 eV, 0.67 eV, and 1.54 eV, while for implantation SBD, defects at 0.15 eV were observed. This indicates a reduction in defects associated with energy levels $Z_{1/2}$ and $EH_{6/7}$, known as lifetime killers, as impurities from nitrogen implantation replace titanium and carbon vacancies.

요 약

본 연구에서는 4H-SiC Epi Surface에 Nitrogen implantation 공정이 깊은준위결함과 lifetime에 미치는 영향을 비교분석하였다. Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS)와 Time Resolved Photoluminescence (TR-PL)을 사용하여 깊은준위결함과 carrier lifetime을 측정하였다. As-grown SBD에서는 0.16 eV, 0.67 eV, 1.54 eV 에너지 준위와 implantation SBD의 경우 0.15 eV 준위에서의 결함을 측정되었으며, 이는 nitrogen implantation으로 불순물이 titanium 및 carbon vacancy를 대체됨으로 lifetime killer로 알려진 $Z_{1/2}$, $EH_{6/7}$ 준위 결함은 감소하였다.

Key words : 4H-SiC, DLTS, defect, carrier lifetime, trap

Ⅰ. 서론

Silicon carbide(SiC)는 고온, 대전류, 고전압과 고주파 특성을 가지는 우수한 소재이다. 이러한 특성은 열악한 환경에서도 사용가능한 소재로 Silicon(Si)을 대체할 수 있고 신재생 에너지, EV/HEV 및 발전소와 같은 높은 전력을 필요로 하는 영역에 적합한 후보 이다[1-3]. 그러나 이러한 SiC 웨이퍼 생산 및 후속 처리 중 결함이 발생한다. 전기적 특성 개선을 위해 결함에 대해 여전히 많은 연구가 필요하다[4-6]. 깊은 준위 결함들에 carrier가

* Dept. of Electronics Engineering, Kwangwoon University
★ Corresponding author
E-mail : smkoo@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5763
※ Acknowledgment
This work was supported by the Kwangwoon Univeristy in 2023, the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) (P0012451) funded by the the National Research Foundation (NRF) (RS-2023-00266246), and the present research has been conducted by the excellent researcher support project of Kwangwoon University in 2023
Manuscript received Oct. 23, 2023; revised Oct. 31, 2023; accepted Dec. 28, 2023.

trapping 되어 leakage current 증가 및 carrier lifetime 감소와 같은 소자에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 defect 심화 연구는 매우 중요하다[7].

4H-SiC에는 $Z_{1/2}$ 및 $EH_{6/7}$의 고유 결함이 관찰된다. 그 외에도 Ion-implantation과 annealing 공정에 따른 결함들은 추가적으로 보고되고 있다[8-10]. 본 연구에서는 먼저 C-V를 측정하여, 80~700 K 범위에서 신뢰할 수 있는 Deep level transient spectroscope (DLTS) 분석이 가능한지를 확인하였다. 분석한 DLTS data를 통해 Deep level trap 정보를 도출하였고, SBD에 nitrogen implantation 여부에 따라 관찰된 deep level trap들을 비교 분석하였다. 이 후, Time Resolved Photoluminescence(TR-PL) 분석법을 통해 carrier lifetime을 비교분석하였다.

II. 실험 방법

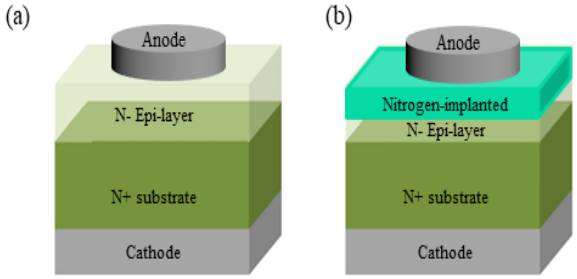

Fig. 1. schematic section view of the SBD devices (a) as-grown and (b) nitrogen implantation.
그림 1. SBD 소자 단면도 (a) as-grown and (b) nitrogen implantation

본 연구에서 사용된 샘플은 4H-SiC를 기반으로 SBD 다이오드를 제작했다. Fig 1 (a)는 SBD, (b)는 (a) 구조 상단에 nitrogen implantation한 샘플의 단면도를 보여준다. Epitaxy layer는 ~10 ㎛의 thickness를 가지며, doping concentration은 ~2×10^{15} cm^{-3} 이다. Ohmic contact과 Schottky contact 모두 Nickel (Ni) 200 ㎚ 두께로 형성하였다. 제작된 SBD 샘플의 C-V를 측정하여 Schottky barrier height (SBH)을 측정한 후, DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy)를 이용하여 deep level trap의 concentration, capture cross section, energy level을 도출하였고, time resolved photoluminescence 측정을 통해 도출된 carrier lifetime과 비교 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. C-V characteristics

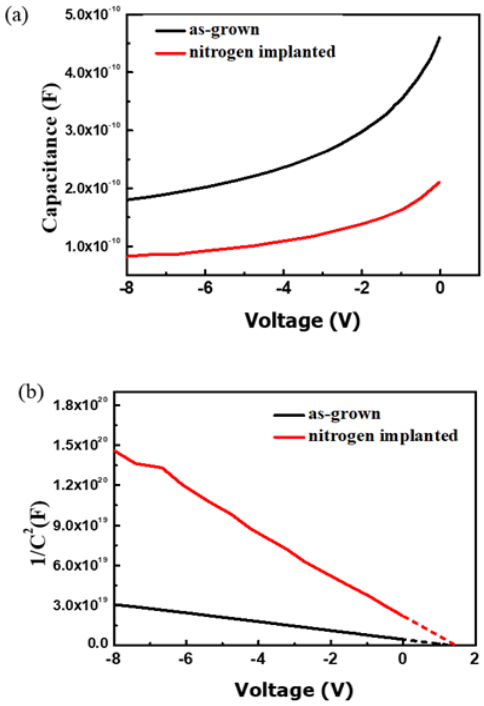

Fig. 2. (a) Typical capacitance-voltage (b) 1/C2-V plot of the as-grown and nitrogen implantation.
그림 2. (a) Capacitance-Voltage 측정 data (b) as-grown, nitrogen implantation 소자 1/C2-V plot.

Fig 2. (a), (b)는 as-grown과 nitrogen implantation 한 샘플의 Voltage-Capacitance 특성으로 50 kHz로 측정하였다. Nitrogen implantation 샘플의 capacitance 값이 작은 것을 확인했다. 이는 Nitrogen implant함으로 불순물이 Titanium 결함을 대체되어 결함이 감소하여 capacitance가 감소하는 것으로 사료된다[11-13]. Fig 2. (a)의 C-V value를 식(1)을 이용해 Fig 2. (b)의 $1/C^2$-V 그래프를 도출할 수 있으며, as-grown, nitrogen implantation의 Built in voltage (V_{bi})는 각각 1.22, 1.44 V이다.

$$\Phi = V_{bi} + (\frac{kT}{q})\ln(\frac{N_c}{N_d}) \quad (1)$$

Fig 2. C-V 특성을 통해 Metal/Semiconductor interface에 Schottky barrier height 1.46, 1.68 eV를 확인했으며, depletion 영역을 확장하여 측정하는 Deep level transient spectroscopy를 이용하여 Trap의 차이를 확인한다.

3.2. DLTS spectra

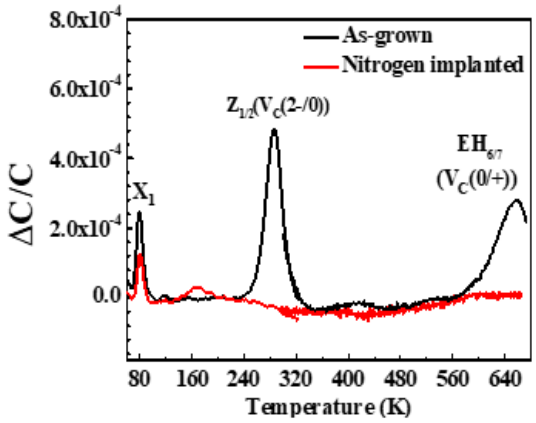

Fig. 3. DLTS spectra of the as-grown and nitrogen implantation.

그림 3. as-grown과 nitrogen implantation 소자 DLTS spectra

Fig. 3은 As-grown과 nitrogen implantation 소자를 60~680 K 온도에서 측정한 Deep Level transient spectra를 보여준다. 두개 샘플 모두 0~110 K에서 1개의 peak(X_1 trap)가 관찰되었고, 추가적으로 As-grown 소자에서 200~320 K($Z_{1/2}$ trap), 550~680 K($EH_{6/7}$ trap)에서 1개 peak이 관찰되었다.

Fig 4 (a)-(c)는 peak가 관찰된 각 온도대역에 대한 2개 샘플의 DLTS spectra를 보여준다.

Fig 4 (a)는 60~110 K 대역의 peak로 As-grown, N-implantation 샘플 모두 관찰되는데, 이 X_1 trap은 energy level 0.13~0.18 eV에서 발견되는 Titanium과 연관된 결함이며, shallow level defect로서 단결정 성장 시 사용되는 graphite의 주요 오염물질인 전이금속(Ti, V)가 SiC 내에 외인성 결함으로 발생한다. Titanium의 격자크기는 약 ~215 pm이며 Nitrogen 이온격자의 크기는 약 ~60 pm으로 Nitrogen implant를 통해 Titanium 결함을 대체한 것으로 사료된다 [12-13].

Fig 4 (b)는 200~320 K (Room temperature) 대역을 보여주며 4H-SiC에서 관찰되는 전형적인 $Z_{1/2}$ peak이 관찰되었다. $Z_{1/2}$는 carbon vacancy에 의해 발생하며 carrier lifetime killer로 보고되고 있다.[14] DLTS로 측정된 $Z_{1/2}$의 energy level은 0.67 eV이며, trap concentration은 5×10^{15} cm^{-3} 이다.

Fig 4 (c)는 550~680 K 대역을 보여주며, As-grown 샘플에서 peak이 관찰되었다. 이는 $EH_{6/7}$으로 $Z_{1/2}$와 동일하게 4H-SiC에서 발생하는 Carbon vacancy이며 energy level은 1.54 eV, trap concentration 1.9×10^{15} cm^{-3} 측정되었다.

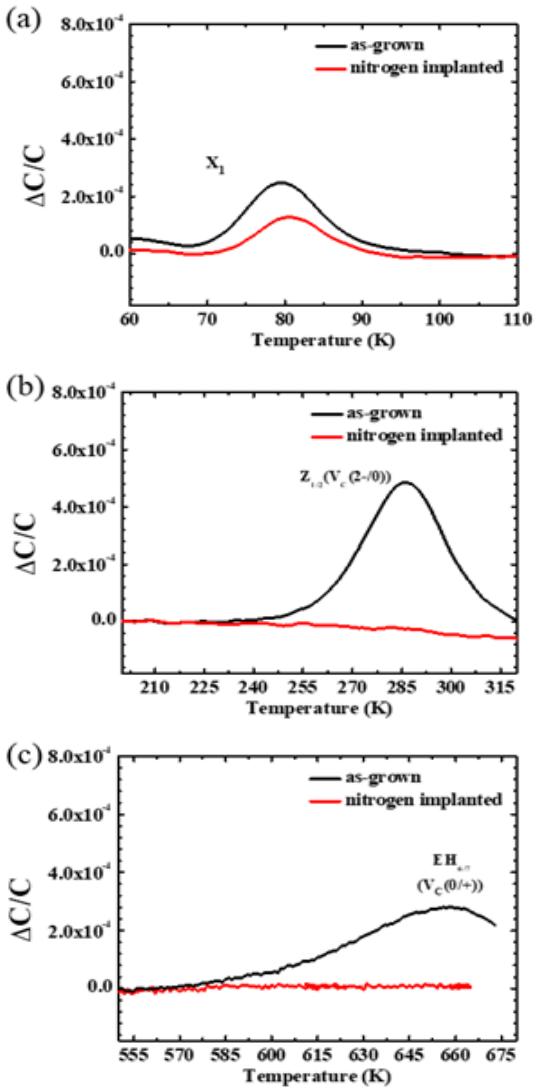

Fig. 4. Detailed DLTS spectra of as-grown and nitrogen implantation for each temperature section where peaks appear (a) 60~110 K, (b) 200~320 K, and (c) 550~680 K.

그림 4. as-grown과 nitrogen implantation 각 온도구간별 DLTS spectra (a) 60~110 K, (b) 200~320 K, and (c) 550~680 K

3.3. Carrier lifetime

Fig 5는 as-grown과 nitrogen implantation한 샘플을 TR-PL측정한 PL signal이다. 샘플에 조사한 source light wave length는 355 ㎚를 사용하였으며 Photo density는 8.6×10^{13}을 사용하였다. peak에서 1/e만큼 PL signal이 감소했을 때의 time이 1/e lifetime이다. as-grown, nitrogen implantation 샘플의 1/e lifetime은 각각 0.00375 ㎲, 0.002 ㎲이다.

nitrogen implantation한 샘플이 0.001 μs 감소한 것을 확인했다.

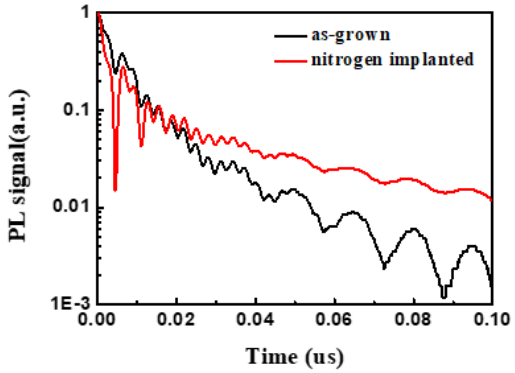

Fig. 5. TR-PL measurement of SBD devices as-grown and nitrogen implantation.

그림 5. as-grown, nitrogen implantation SBD 소자 TR-PL 측정 data.

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 Nitrogen Implantation공정 유무에 따른 SiC SBD구조에서의 Deep level준위 결함의 분포와 이와 연계한 carrier lifetime을 분석하였다. As-grown 소자의 경우 4H-SiC의 lifetime killer로 알려진 $Z_{1/2}$ (Ec-0.67 eV), $EH_{6/7}$(Ec-1.54 eV) 그리고 X_1(Ec-0.13 ~0.18 eV)의 준위에서 결함이 확인되었으며, Nitrogen implantation을 거친 소자는 이러한 결함들이 줄어들고 X1 준위를 중심으로 한 결함들이 확인되었다. 또한 TR-PL 측정을 통하여 이러한 결함들이 carrier lifetime에 미치는 영향을 분석하였으며, Nitrogen implantation된 소자의 1/e lifetime이 As-grown 소자 보다 0.001 μs 감소함을 확인하였다. 공정에 따른 결함 준위와 농도의 변화와 함께 carrier lifetime에 미치는 영향이 매우 중요하며 보다 심화된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] Son, Woo-Young, et al. “Al Implantation and Post Annealing Effects in n-Type 4H-SiC,” *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* 15.7 (2020). DOI: 10.1166/jno.2020.2818

[2] J. Yang, S. Ahn, F. Ren, S. J. Pearton, S. Jang, and A. Kuramata, IEEE Electron Device Lett., 38, 906 (2017). DOI: 10.1109/LED.2017.2774118

[3] Lee, Jinseon, Tai Young Kang, and Kyung Hwan Kim. “Electrical Characteristics of the SiC SBD Prepared by using the Facing Targets Sputtering Method,” *Journal of the Semiconductor & Display Technology* 14.1 (2015).

[4] Y. J. Lee, S. Cho, J. H. Seo, S. J. Min, J. I. An, J. M. Oh, S. M. Koo, and D. Lee, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., 31, 367 (2018).

[5] Byun, Dong-Wook, et al. “Deep Level Defect Transient Spectroscopy Analysis of 4H-SiC SBD and JBS Diodes,” *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engi-neers* 34.3 (2021): 214-219.

[6] S. J. Min, M. C. Shin, N. T. Nguyen, J. M. Oh, and S. M. Koo Materials 13, 445 (2020).

[7] Harada, Shunta, et al. “Suppression of stacking fault expansion in a 4H-SiC epitaxial layer by proton irradiation,” *Scientific Reports* 12.1 (2022): 13542.

[8] Dalibor, Thomas, et al. “Electrical properties of the titanium acceptor in silicon carbide,” *Physical Review* B 55.20 (1997): 13618. DOI: 10.1103/PhysRevB.55.13618

[9] Dalibor, T., et al. “Deep defect centers in silicon carbide monitored with deep level transient spectroscopy,” *physica status solidi* (a) 162.1 (1997): 199-225. https://doi.org/10.1002/1521-396X(199707)162:1〈199::AID-PSSA199〉3.0.CO;2-0

[10] Zippelius, Bernd, Jun Suda, and Tsunenobu Kimoto. “High temperature annealing of n-type 4H-SiC: Impact on intrinsic defects and carrier lifetime,” *Journal of Applied Physics* 111.3 (2012). DOI: 10.1063/1.3681806

[11] Basile, A. F., S. Dhar, and P. M. Mooney. “Electron trapping in 4H-SiC MOS capacitors fabricated by pre-oxidation nitrogen implantation,” *Journal of Applied Physics* 109.11 (2011). DOI: 10.1063/1.3583574

[12] Kato, Masashi, Atsushi Yoshida, and Masaya Ichimura. “Estimation of surface recombination velocity from thickness dependence of carrier lifetime in n-type 4H-SiC epilayers,” *Japanese*

Journal of Applied Physics 51.2S (2012): 02BP12. DOI: 10.1143/JJAP.51.02BP12

[13] Kato, Masashi, et al. "Excess carrier lifetime in a Bulk p-type 4H-SiC wafer measured by the microwave photoconductivity decay method," *Japanese Journal of Applied Physics* 46.8R (2007): 5057. DOI: 10.1143/JJAP.46.5057

[14] Hiyoshi, T. and Kimoto, T., 2009. "Reduction of deep levels and improvement of carrier lifetime in n-type 4H-SiC by thermal oxidation," *Applied Physics Express,* 2(4), p.041101. DOI: 10.1143/APEX.2.041101

BIOGRAPHY

Myeong-Cheol Shin (Member)

2023 : Ph.D. degree. Kwangwoon University
2019 : M.S. degree from Far-East University
2017 : B.S. Dept. of Photovoltaic Engineering, Far East University

Geon-Hee Lee (Member)

2021. 03.~present : Ph.D. course. Kwangwoon University
2021 : M.S. degree from Far-East University
2019 : B.S. Dept. of Photovoltaic Engineering, Far East University

Ye-Hwan Kang (Member)

present : SK Powertech inc.
Ph.D. candidate. Kwangwoon Univercity
2013 : M.S. degree from Far-East University

Ye-Hwan Kang (Member)

2008 : BS, Kwangwoon University
2010 : MS, Kwangwoon University
2013 : Ph D, Tokyo Institute of Technology
2013~2016 : [Senior Research Engineer] Samsung Electro-Mechanics, Korea

Ye-Hwan Kang (Member)

2004 : B.S. in Materials Science & Engineering KAIST
2011 : Pd. D. in Materials Science & Engineering KAIST
2012~2016 : Research Staff Member, Samsung Electronics Advanced Institute of Technology
2016~2019 : Senior Researcher, Korea Ceramic Technology Institute

Sang-Mo Koo (Member)

1993 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
1997 : MS degree in Engineering Material Physics, KTH - The Royal Institute of Technology.
2003 : PhD degree in Electronics, KTH-The Royal Institute of Technology.
1999 : Visiting Researcher, MIT, Cambridge, MA, USA
2003~2006 : Researcher, Semiconductor Electronics Division, National Institute of Standards and Technology (NIST), MD, USA
2006~2011 : Assistant Professor Kwangwoon University
2014~current : Full Professor, Kwangwoon University
2017~current : Director, Wide Bandgap Semiconductor Reserach Center