

β -Ga₂O₃/4H-SiC MESFETs에서의 Self-Heating

김민영, 서현수, 서지우, 정승우, 이희재, 변동욱, 신명철,
Michael A. Schweitz, 구상모 

광운대학교 전자재료공학과

Self-Heating Effects in β -Ga₂O₃/4H-SiC MESFETs

Min-Yeong Kim, Hyun-Su Seo, Ji-Woo Seo, Seung-Woo Jung, Hee-Jae Lee, Dong-Wook Byun,
Myeong-Cheol Shin, Michael A. Schweitz, and Sang-Mo Koo

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

(Received August 31, 2021; Revised September 17, 2021; Accepted September 24, 2021)

Abstract: Despite otherwise advantageous properties, the performance and reliability of devices manufactured in β -Ga₂O₃ on semi-insulating Ga₂O₃ substrates may degrade because of poorly mitigated self-heating, which results from the low thermal conductivity of Ga₂O₃ substrates. In this work, we investigate and compare self-heating and device performance of β -Ga₂O₃ MESFETs on substrates of semi-insulating Ga₂O₃ and 4H-SiC. Electron mobility in β -Ga₂O₃ is negatively affected by increasing lattice temperature, which consequently also negatively influences device conductance. The superior thermal conductivity of 4H-SiC substrates resulted in reduced β -Ga₂O₃ lattice temperatures and, thus, mitigates MESFET drain current degradation. This, in turn, allows practically reduced device dimensions without deteriorating the performance and improved device reliability.

Keywords: MESFET, β -Ga₂O₃, 4H-SiC, Self-heating effect

β -Ga₂O₃는 약 4.8 eV의 큰 에너지 밴드갭을 가지고 있는 물질로, 이는 고에너지 갭 반도체 가운데 다이아몬드 다음으로 큰 값이며, 약 8 MV/cm의 큰 임계 전계값을 갖고 있어, 고내압, 저손실 전력 반도체 소자로서 유용하게 사용될 수 있다 [1-3]. 또한 반도체 성능 지수를 나타내는 Baliga's figure of merit (BFOM)이 4H-SiC에 비해 약 10배 더 크다 [4,5]. 위와 같은 많은 장점으로 인해 β -Ga₂O₃ MESFET (metal semiconductor field effect transistor)는 고효율 전력 반도체 소자로서 자동차, 인공 위성, 5G 기술 산업 등에서 많은 기대를 받고 있다.

✉ Sang-Mo Koo; smkoo@kw.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한편, 그럼에도 불구하고 β -Ga₂O₃는 약 0.13 W/cm·K 정도의 매우 낮은 열전도도를 갖고 있다 [6]. 이는 Si (1.5 W/cm·K) 및 SiC (3.3 W/cm·K)의 경우에 비하여 상당히 낮은 값이며 [4,7], 이 때문에 소자 동작 시 발생하는 열을 분산시키는 것이 어렵고, 소자의 동작 온도가 상승하게 된다. 게다가 고주파 소자인 MESFET 및 HEMT 구조는 일반적인 MOSFET 구조와 비교하여서도, 절연층이 없기 때문에 self-heating 현상에 더욱 취약한 특성을 보인다 [8]. 이러한 특성은 전자 이동도에 영향을 주어 드레인 전류가 감소하게 되고, 소자 신뢰성을 저하시키기에 self-heating을 줄이기 위한 연구는 필수적이다 [9-11].

이에 본 연구에서는 β -Ga₂O₃ MESFET에서의 기판 물성, 소자의 구조가 self-heating 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 일반적인 구조의 β -Ga₂O₃ MESFET 소자

와 4H-SiC 기판을 사용하여 이종 구조를 적용한 소자의 특성을 비교하고자 하였다 [2]. Self-heating의 정도를 확인하기 위해 소자의 전기적인 특성과, 소자의 열 분포를 Silvaco사의 2차원 시뮬레이터 atlas를 사용하였다.

그림 1은 β -Ga₂O₃ MESFET 소자를 나타내고 있으며, 소자의 구조에 따른 파라미터는 표 1에 표기하였다. 그림 1(a)는 동종 구조의 β -Ga₂O₃ MESFET [device (A)]와 (b) 4H-SiC 기판을 이용한 이종 구조의 MESFET [device (B)]이다. 그림 1의 소자는 β -Ga₂O₃와 4H-SiC 두 가지 semi-insulating 기판 위에 각각 $3.27 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑 농도를 갖는 β -Ga₂O₃를 300 nm의 두께의 박막을 형성하였다. 표 1에 표기된 바와 같이 기판의 두께는 300 μm 로 설정하였다. 소스와 드레인, 게이트 크기는 4 μm , 전극 간의 거리는 8 μm 로 설계하였다. 기존 동종 접합 구조의 MESFET과 비교하였을 때의 이종 접합 구조의 output 전기적 특성을 비교하였고, 이와 함께 소자의 온도 분포 및 전자 이동도를 비교하였다. 이후에 게이트와 드레인 사이의 거리를 4 μm , 8 μm 및 12 μm 로 변화시키며 이에 따른 self-heating 정도를 확인하였다.

β -Ga₂O₃ 물질의 특성은 표 2를 참조하였으며, β -Ga₂O₃와 4H-SiC의 열전도도는 각각 0.13과 3.3 W/cm \cdot K로 설정하였다 [4]. 또한, LAT.TEMP 파라미터를 소자의 모델로 설정하여 소자 내 열의 흐름을 고려하도록 하였으며, self-heating이 전기적 특성에 영향을 미칠 때와 미치지 않을 때의 전류 밀도 차이를 비교하였다.

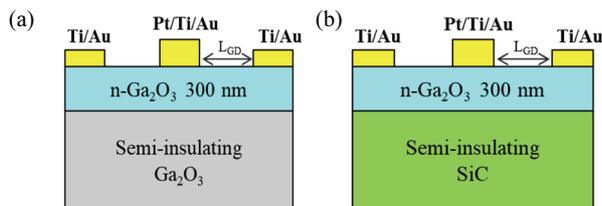


Fig. 1. A schematic cross section of the simulated β -Ga₂O₃ MESFET device with (a) homostructure [device (A)] and (b) heterostructure [device (B)].

Table 1. Parameters of the structure for MESFET.

Parameters	Value	Description
L_G	4 μm	Gate length
N_d	$3.27 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	Channel doping
L_{SG}	8 μm	Source to gate spacing
L_{GD}	8 μm	Gate to drain spacing
T_{ch}	300 nm	Channel thickness
$T_{substrate}$	300 μm	Substrate thickness

그림 2는 V_{GS} 를 +1에서 -2 V까지 변화시켰을 때의 output 특성을 나타낸다. 두 소자의 전류 밀도는 그림 2(a)와 (b)에서 V_{GS} 가 감소할수록 감소하는 경향을 보인다. 그림 2(a)는 동종 접합 구조의 device (A), (b)는 이종 접합 구조의 device (B) 특성으로, 같은 V_{GS} 일 때 두 소자의 전류 밀도를 비교하면, device (B)의 전류 밀도가 device (A)에 비해 더 큰 것을 확인할 수 있다.

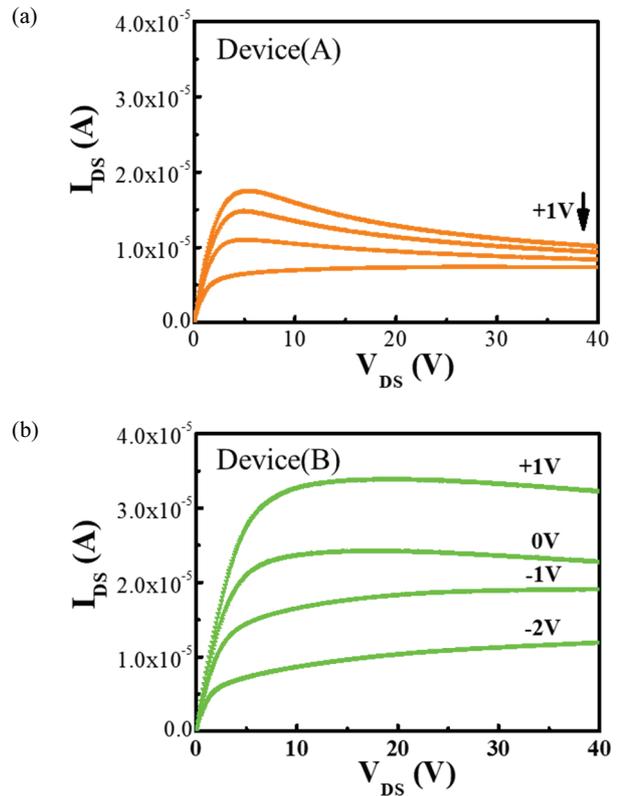


Fig. 2. Output characteristics obtained from TCAD for (a) device (A) and (b) device (B).

Table 2. Simulation parameters for the MESFET structure.

Parameters	β -Ga ₂ O ₃	4H-SiC
Bandgap energy (eV)	4.8	3.26
Electron affinity (K \cdot J/mol)	4.0	4.05
Permittivity (V/m)	10	9.66
Substrate mobility (cm ² /V \cdot s)	20	460
Channel mobility (cm ² /V \cdot s)	118	-
Thermal conductivity (W/cm \cdot K)	0.13	3.3

V_{GS} 가 1 V, V_{DS} 가 5.5 V일 때, device (A)의 전류는 약 17.6 μA 로 최댓값이다. 이후, V_{DS} 가 증가함에 따라 감소하여 $V_{DS}=40$ V에서 10 μA 로 약 7.6 μA 가 감소한다. 반면, device (B)의 전류 최댓값은 약 V_{DS} 가 15.9 V일 때 33.8 μA 이며, 이후 감소하여 V_{DS} 가 40 V일 때 32.3 μA 로 관찰되었다. Device (B)는 device (A)에 비해 전류의 감소량이 작음을 확인할 수 있었다. 두 소자 모두, I_{DS} 가 최댓값 이후에 감소하는 경향을 보이는데, 이는 self-heating로 인한 이동도 감소와 연관이 있는 것으로 판단된다 [12].

그림 3은 $V_{GS}=0$ V일 때, 열전도 방정식(lattice heat flow equation)을 적용한 $I_{DS}-V_{DS}$ 특성을 보여준다. 파라미터(LAT.TEMP)를 설정하여 식 (1)을 통해 소자 내의 열의 흐름을 계산하였다.

$$C \frac{\partial T_L}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T_L) + H \quad (1)$$

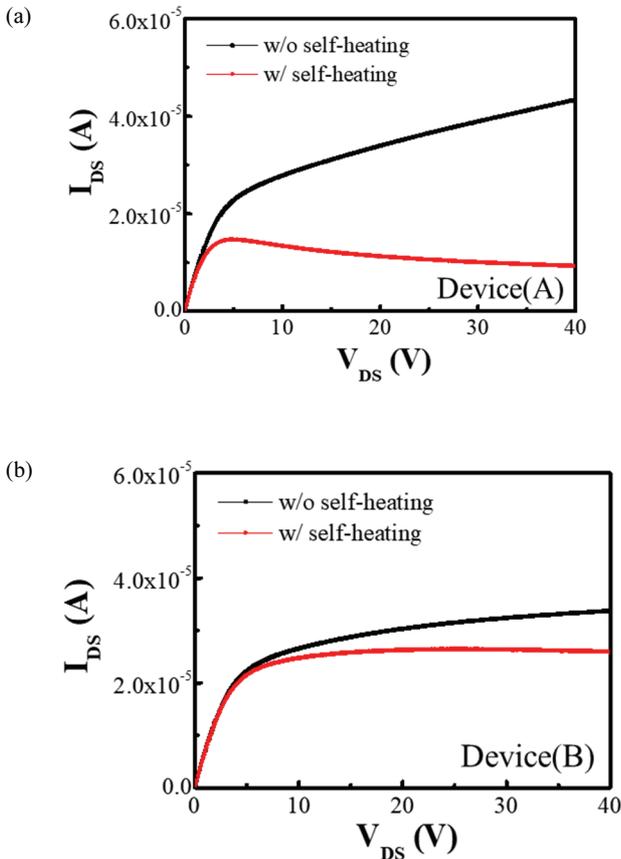


Fig. 3. Output characteristics obtained from TCAD compact model for (a) device (A), and (b) device (B) compared with w/ self-heating effect and w/o self-heating effect. (c) Comparison of I_{DS} with self-heating effect on the FETs.

소자 내 열의 흐름에 영향을 주는 열전도도(κ)는 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 는 0.13, 4H-SiC는 3.3 W/cm \cdot K로 설정했다. 식 (1)에서 C 는 부피당 열용량, T_L 은 소자 내 격자 온도, H 는 발생하는 열의 양을 나타낸다.

그림 3(a)와 (b)에서 w/ self-heating 그래프는 열전도 방정식을 고려하여 self-heating 현상이 반영된 그래프를 나타내며, w/o self-heating 그래프는 self-heating 현상이 반영되지 않은 이상적인 전류를 나타낸다. 그래서 위의 그래프를 통해 self-heating으로 인해 감소한 전류량을 비교할 수 있다. 그림 3(a)는 device (A)의 전기적 특성 그래프, (b)는 device (B)의 그래프이다. Device (A)는 $V_{GS}=0$ V, $V_{DS}=40$ V에서 self-heating로 인해 약 34 μA 가 감소하고, 반면 device (B)의 소자에서는 동일 조건에서 7.8 μA 가 감소한다. 이를 보다 명확하게 확인하기 위해 그림 3(c)에서 self-heating의 영향을 받은 경우와 그렇지 않은 경우의 전류량의 비율로 나타냈다. 이를 통해 $V_{DS}=40$ V에서 device (A)의 전류는 self-heating의 영향을 받지 않은 이상적인 전류 대비 약 77% 감소하고, device (B)의 경우, 약 22% 감소한 것을 확인할 수 있다. Self-heating은 MESFET 소자의 드레인 전류 감소를 야기할 수 있다는 것이 보고되며 [13], 이중 접합 구조를 통하여 self-heating으로 인한 전류 감소를 줄일 수 있음을 확인했다.

그림 4는 각 두 MESFET의 상대적인 전자 이동도 특성을 보여준다. 그림 4(b)는 기판으로부터 1 μm 위의 전자 이동도 특성을 x축 방향에 따라 보여주고 있다. 이때, 소자의 전자 이동도는 약 17 μm 부근에서 최솟값이며, 이 영역은 드레인 쪽의 게이트 가장자리이다. Device (B)와 device (A)에서의 전자 이동도 최솟값은 각각 70 cm 2 /Vs, 63 cm 2 /Vs이다. 그 밖의 영역에서 device (B)는 약 1,290

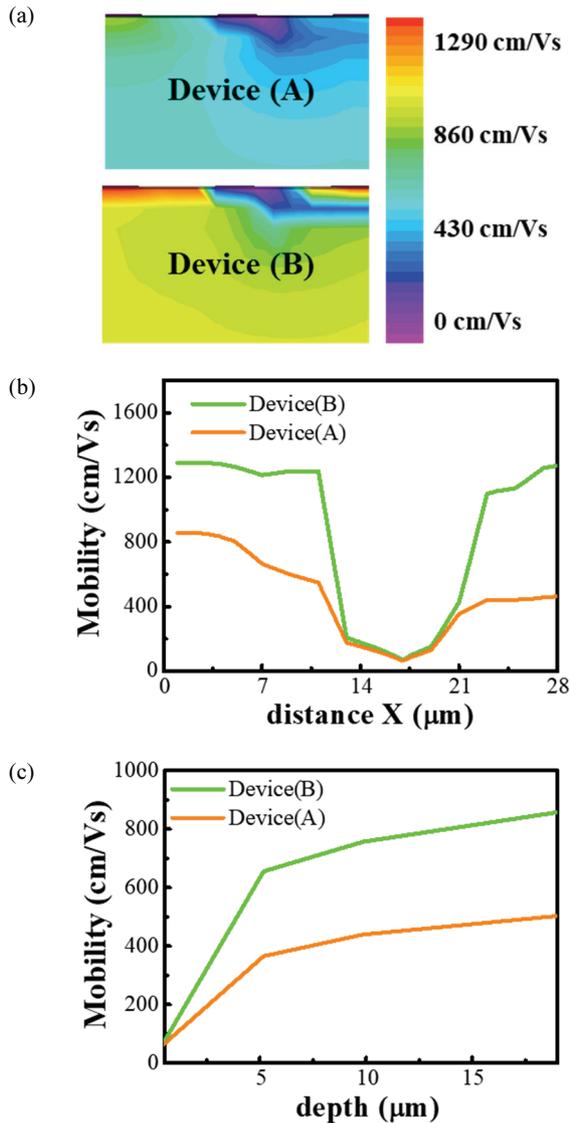


Fig. 4. The cross-sectional electron mobility profiles at $V_{GS}=0$ V and $V_{DS}=40$ V for β -Ga₂O₃ MESFETs with (a) device (A), and device (B). The mobility of the FET on different substrates, viz., 4H-SiC and β -Ga₂O₃, (b) mobility profile of region that above from 0.1 μ m substrate, and (c) mobility profile from surface to below 20 μ m, at $x=17$ μ m.

cm/Vs, device (A)는 약 858 cm/Vs의 전자 이동도 값을 가진다. Device (A)에 비해 device (B) 소자는 전계 효과 이동도(field-effect mobility)가 더 증가할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 4(c)는 $X=17$ μ m에서 소자의 표면부터 20 μ m까지의 전자 이동도를 나타낸다.

그림 5는 V_{GS} 가 0 V, V_{DS} 가 40 V일 때의 각기 다른 두 소자의 소자 열 분포도를 보여준다. 두 소자의 기판 온도는 모두 300 K로 설정하였다. Device (A)는 기판에 비해 게이

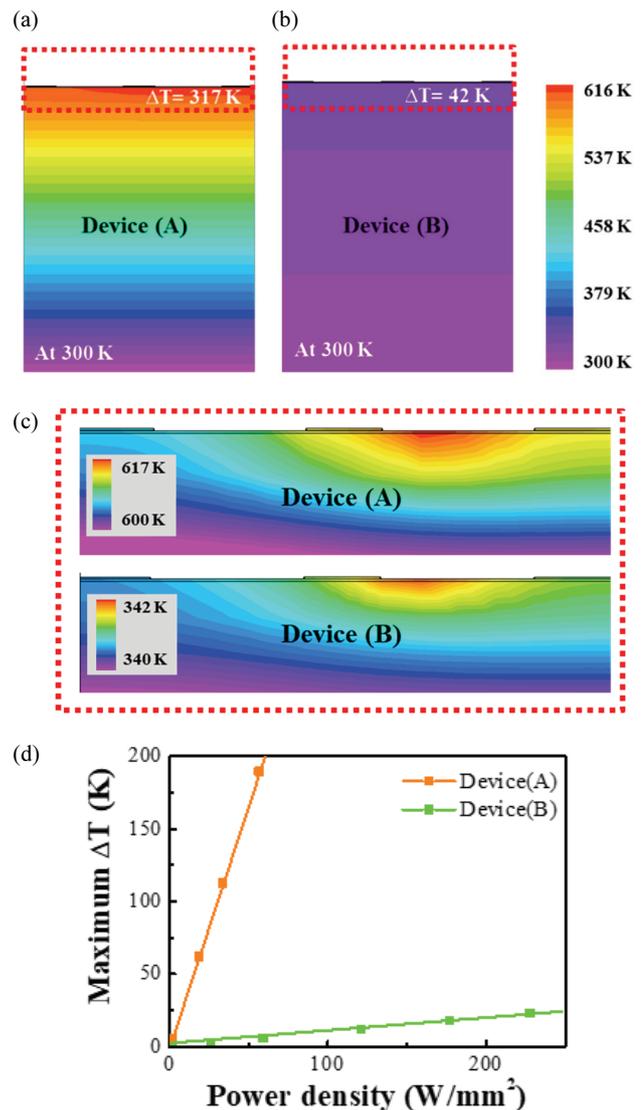


Fig. 5. Temperature profiles obtained at $V_{GS}=0$ V and $V_{DS}=40$ V for (a) device (A) and (b) device (B). (c) The temperature of the device (A) and device (B). (d) Maximum temperature rise (ΔT) in the devices from the TCAD model.

트 부근이 약 317 K 상승한 617 K이고, device (B)는 약 42 K 상승하여 342 K으로 나타났다. 두 소자는 드레인 쪽 게이트의 가장자리에서 가장 높은 온도 상승률을 보였다. 이는 전자 이동도의 값이 가장 작게 관찰된 영역과 비슷하다. Self-heating으로 인한 소자의 온도 상승과 전자 이동도 감소는 연관이 있을 수도 있다 [12,13]. 그림 4(d)는 각 소자의 전력 밀도별 온도 상승률을 나타낸 그래프이며, 같은 전력 대비 device (A)에서의 온도 상승이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다.

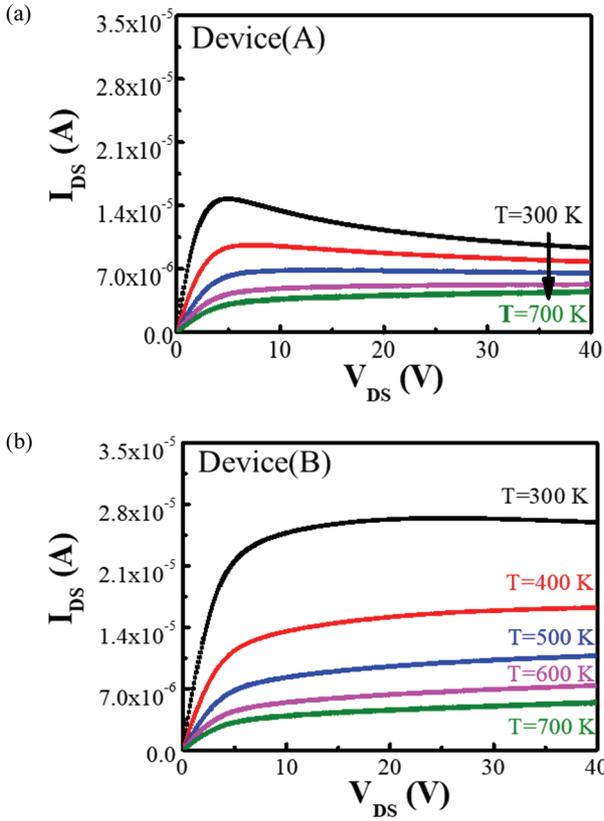


Fig. 6. Substrate temperature dependent I_{DS} - V_{DS} of MESETs.

그림 6은 기판 온도를 300 K에서 700 K까지 증가시킬 때의 I_{DS} - V_{DS} 이다. 두 소자 모두 온도가 증가할수록 전류량이 감소한다. 또한 전류의 최대값과, V_{DS} 가 40 V일 때의 전류량의 차이는 온도의 증가에 따라 감소한다. 주변 온도가 높아지면, self-heating이 소자의 전기적 특성에 주는 영향이 상대적으로 감소한다. 300 K, V_{DS} =40 V에서 device (B)의 전류는 25.9 μ A, device (A)는 9.33 μ A로 이 종 소자의 전류가 약 2.77배 크다. 온도가 증가함에 따라 두 소자의 전류 차이가 감소하여, 700 K에서는 device (B)의 전류가 5.49 μ A, device (A)의 전류가 4.49 μ A이다. 이는 device (B)의 전류가 device (A)의 전류에 비해 1.2배 더 큰 값을 나타낸다.

그림 7은 게이트와 드레인 사이의 거리에 따른 I_{DS} 이다. 그림 7(a)에서 확인할 수 있듯이, device (B)에 비해 device (A)는 self-heating로 인한 전류의 감소가 크다. 그림 7(b)에서 V_{DS} 의 범위를 30 V에서 40 V로 자세히 보면, device (B)의 경우 게이트와 드레인 사이의 거리가 12 μ m일 때 가장 전류가 적게 감소하며, 거리가 4 μ m일 때 전류의 감소량이 가장 크다. 하지만 device (A)에서는 이러한 경향

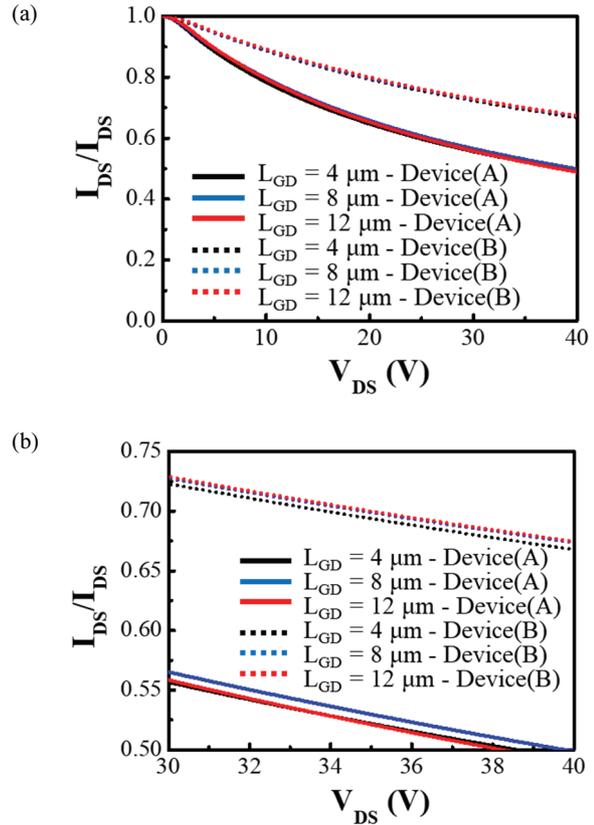


Fig. 7. Characteristics of I_{DS} - V_{DS} , with variety of value of gate to drain spacing, obtained at V_{GS} =0 V (a) the drain voltage from 0 to 40 V with a 0.1 Vstep and (b) V_{DS} from 30 V to 40 V.

과 다르다. 이러한 전류 감소는 채널의 길이와, 물질적 특성 등 복합적인 영향이 있을 수 있다 [14-17].

그림 8은 게이트로부터의 거리에 따른 온도 특성을 전극 사이의 거리에 따라 나타낸 것으로 소자 내 온도를 그래프화하였다. 그림 8(a)에 표기된 X-X'에 따라 그림 8(b)는 device (A), (c)는 device (B) 소자의 온도 특성을 보여준다. Device (B)에서 전극 간 거리가 4, 8, 12 μ m에서 각각의 최고 온도와 최저 온도의 차이는 각각 0.8, 0.67과 0.57 K으로 전극 간의 거리가 길어짐에 따라 온도 상승률은 감소한다. 하지만 device (A)에서는 거리가 각 4, 8 및 12 μ m일 때 최고 온도와 최저 온도의 차는 각각 5, 4.32와 6.6이다. 이는 그림 7의 전류량 감소 그래프의 경향과 비슷하다.

본 연구에서는 β -Ga₂O₃ MESFET 소자의 self-heating 특성을 분석하고, 기판의 물성을 고려한 소자 구조 변화를 통해 이를 개선하는 방법을 제안하였다. Self-heating로 인해 가장 높게 온도가 상승하는 영역은 게이트와 드레인

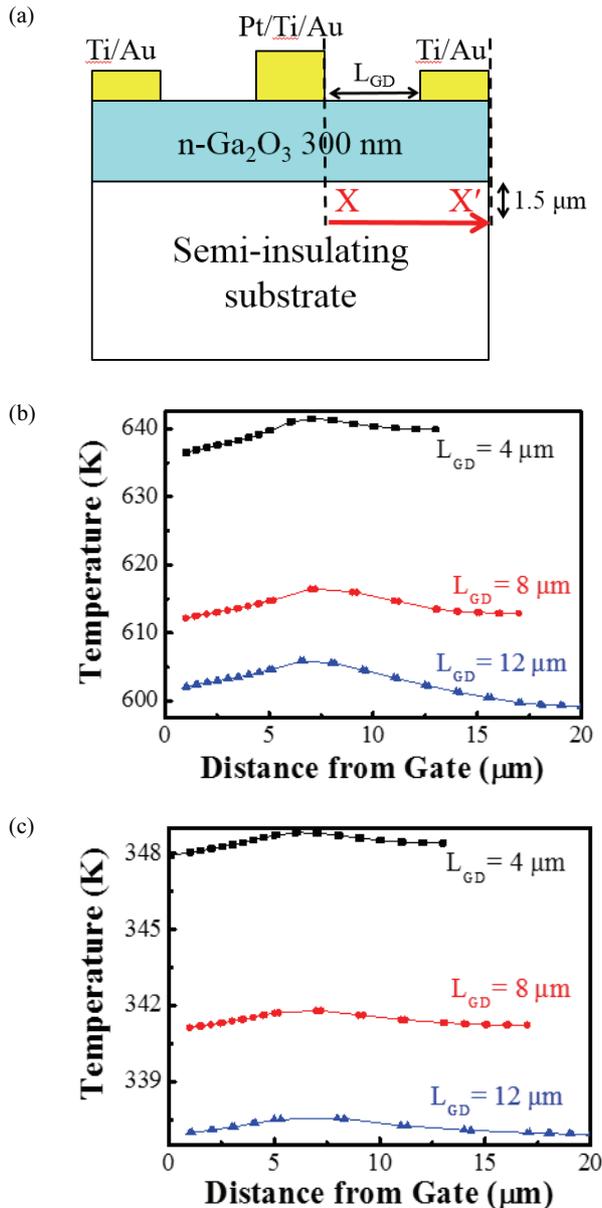


Fig. 8. The bias condition is $V_{GS}=0$ V, $V_{DS}=40$ V. (a) The device cross section. Temperature distribution along lateral position from gate (XX') of 1.5 μm below interface with various gate to drain spacing (b) device (A) and (c) device (B).

사이 영역의 거리가 증가할수록 self-heating의 영향이 감소함을 확인하였다. 또한 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 기판을 약 25배 더 큰 열전도도를 가진 4H-SiC으로 대체하여 소자 내 최고 온도를 617 K에서 342 K으로 줄이고, self-heating으로 인한 전류 감소량을 약 55% 줄일 수 있었다. 또한 기판을 바꿈으로써, 같은 소자 크기 내에서 전체적인 전류량이 최대

2.63배($V_{GS}=1$ V), 최소 1.41배($V_{GS}=-2$ V) 증가하였다. 이는 같은 전류량 대비 소자의 소형화가 가능하여 고밀도 집적을 가능하게 해준다.

ORCID

Sang-Mo Koo

<https://orcid.org/0000-0002-9827-9219>

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant (2021R1F1A1057620) funded by MSIT, Technology Innovation Program (20016102) funded by MOTIE, Korea, and the Excellent Researcher Support project of Kwangwoon University in 2021.

REFERENCES

- [1] Y. J. Lee, M. A. Schweitz, J. M. Oh, and S. M. Koo, *Materials*, **13**, 434 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13020434>]
- [2] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 013504 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3674287>]
- [3] D. W. Byun, Y. J. Lee, J. M. Oh, M. A. Schweitz, and S. M. Koo, *Electron. Mater. Lett.*, **17**, 479 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s13391-021-00297-6>]
- [4] S. A. Russell, A. Pérez-Tomás, C. F. McConville, C. A. Fisher, D. P. Hamilton, P. A. Mawby, and M. R. Jennings, *IEEE J. Electron Devices Soc.*, **5**, 256 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JEDS.2017.2706321>]
- [5] B. J. Baliga, *IEEE Electron Device Lett.*, **10**, 455 (1989). [DOI: <https://doi.org/10.1109/55.43098>]
- [6] B. K. Mahajan, Y. P. Chen, J. Noh, P. D. Ye, and M. A. Alam, *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 173508 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5116828>]
- [7] S. Périchon, V. Lysenko, B. Remaki, D. Barbier, and B. Champagnon, *J. Appl. Phys.*, **86**, 4700 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.371424>]
- [8] Y. Chang, Y. Zhang, Y. Zhang, and K. Y. Tong, *J. Appl. Phys.*, **99**, 044501 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2171776>]
- [9] Z. Ramezani and A. A. Orouji, *IEEE Trans. Electron Devices*, **61**, 3570 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2352317>]
- [10] S. Jo, G. Yoo, and J. Heo, *J. Korean Phys. Soc.*, **74**, 1171 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.74.1171>]
- [11] A. S. Royet, T. Ouisse, B. Cabon, O. Noblanc, C. Armodo, and C.

- Brylinski, *IEEE Trans. Electron Devices*, **47**, 2221 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1109/16.877187>]
- [12] T. H. Shim, S. J. Kim, G. S. Lee, K. S. Kim, W. J. Cho, and J. G. Park, *J. Appl. Phys.*, **103**, 094522 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2913498>]
- [13] M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 123511 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4821858>]
- [14] J. Cho, Z. Li, M. Asheghi, and K. E. Goodson, *Annu. Rev. Heat Transfer*, **18**, 7 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2015011335>]
- [15] J. W. Yu, P. C. Yeh, S. L. Wang, Y. R. Wu, M. H. Mao, H. H. Lin, and L. H. Peng, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 183501 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4764554>]
- [16] D. Madadi and A. A. Orouji, *Mater. Today Commun.*, **26**, 102044 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102044>]
- [17] J. Oh, J. Ma, and G. Yoo, *Results Phys.*, **13**, 102151 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.087>]