Journal of Radiation Industry 15(4) : 275~281(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.275

질화갈륨 기반 전자소자의 고에너지 양성자 조사 영향평가를 위한 전산모사 모델링 연구

윤영준[1] · 이재상[1] · 김유종[1] · 석오균[2] · 이정희[3] · 김동석[1,*]

[1]한국원자력연구원 양성자과학연구단, [2]금오공과대학교 전자공학부,
[3]경북대학교 IT대학 전자전기공학부

Simulation Modeling for Evaluating High-energy Proton Irradiation Effects of Gallium Nitride-based Electronics

Young Jun Yoon[1], Jae Sang Lee[1], Yujong Kim[1], Ogyun Seok[2],
Jung-Hee Lee[3] and Dong-Seok Kim[1,*]

[1]*Korea Multi-purpose Accelerator Complex, Korea Atomic Energy Research Institute, Gyeongju 38180, Republic of Korea*
[2]*School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea*
[3]*School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea*

Abstract - Gallium Nitride (GaN)-based electronics have been studied as high-frequency electronics for space applications because of a two-dimensional electron gas (2DEG) with high carrier density and mobility as well as a strong resistance for radiation. The understanding of the space radiation effects on electronics is important to employ GaN-based devices as space electronics because the space radiation, including protons, electrons, and heavy ions, degenerate current characteristics of GaN electronics. In this work, we studied simulation modeling for the proton irradiation effect in GaN devices by using technology computer aided design (TCAD) simulator. Point defects, including Ga and N vacancies created by the radiation damage, were applied in the barrier, channel, and buffer regions to consider the displacement damage. Parameters for contact resistance and schottky tunneling were also optimized to reflect the proton irradiation damage. The simulation results for drain current characteristics before and after the proton irradiation were evaluated by comparing with experiment results. The simulation results showed a similar tendency to the experimental results and reflected the phenomenon in GaN device after the proton irradiation well. The modeling results can contribute to predict space radiation effects in GaN electronics.

Key words : GaN, HEMT, Proton irradiation, Simulation modeling, Displacement damage

* Corresponding author: Dong-Seok Kim, Tel. +82-54-750-5310,
Fax. +82-54-750-5402, E-mail. dongseokkim@kaeri.re.kr

서 론

질화갈륨(Gallium Nitride, GaN) 기반 전자소자는 AlGaN/GaN 이종접합(heterojunction) 구조로 소자를 제작할 경우에 AlGaN/GaN 계면에서 높은 전자농도와 높은 전자이동도를 가지는 이차원전자채널(two-dimensional electron gas, 2DEG)층이 형성되어 낮은 온저항(on-resistance)과 높은 고주파(high-frequency) 특성을 얻을 수 있다(Mishra *et al*. 2002; Ueda *et al*. 2014). 또한 질화갈륨은 실리콘(Silicon, Si)에 비해 높은 원자 변위(atomic displacement) 에너지를 가지고 있기 때문에 질화갈륨 전자소자는 우수한 내방사선 특성을 가질 수 있다(Ionascut-Nedelcescu *et al*. 2002; Weaver *et al*. 2016). 그리하여 질화갈륨 전자소자의 이러한 특성을 바탕으로 인공위성 통신용 증폭기(amplifier)로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Muraro *et al*. 2010; Florian *et al*. 2013; Waltereit *et al*. 2013). 우주 환경에서 활용되기 위해서는 우수한 소자 특성뿐만 아니라 우주방사선에 대한 높은 신뢰성이 있어야 한다. 국내외 연구그룹에서 고에너지 양성자, 전자, 중이온 등을 조사하는 우주방사선 모사 실험을 통하여 방사선이 전자소자에 미치는 영향 평가를 수행하고 있다(Polyakov *et al*. 2012; Hwang *et al*. 2013; Abbate *et al*. 2015; Kim *et al*. 2021). 다양한 방사선 종류뿐만 아니라 우주방사선 에너지 범위를 고려하여 여러 에너지 범위에 대한 방사선 영향 평가 또한 수행되고 있다(Keum and Kim 2018; Kim *et al*. 2020). 하지만 우주방사선 모사 실험을 진행하는 경우에는 상당한 시간과 비용이 소요되므로 전산모사 기술을 활용하여 효율적으로 접근할 필요가 있다. 또한, 우주방사선 영향을 예측 가능한 전산모사를 이용하면 내방사선 소자와 회로 설계 측면에서도 큰 이점을 가진다.

그리하여 본 논문에서는 질화갈륨 기반 전자소자의 양성자 영향 평가 전산모사 모델을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 전산모사 모델링을 위하여 반도체 소자 TCAD 시뮬레이터 Synopsys사 Sentaurus를 활용하였다. 양성자 조사 후 소자 특성에 영향을 미칠 수 있는 결함(vacancy), 접촉저항(contact resistance), 쇼트키 터널링(Schottky tunneling) 현상 등을 반영하였으며, 이전에 수행하였던 양성자 조사 실험 결과(Kim *et al*. 2021)와 비교를 통하여 전산모사 모델의 성능과 신뢰성을 검증하였다.

방 법

1. 질화갈륨 전자소자 구조 설계 및 실험/전산모사 결과 Fitting

본 연구에서는 양성자 조사 실험을 진행하였던 AlGaN/GaN 이종접합 기반 HEMT (High-electron mobility transistor) (Kim *et al*. 2021)를 기반하여 전산모사 모델링을 수행하였다. Fig. 1은 AlGaN/GaN 이종접합 기반 HEMT 구조를 보여준다. HEMT 구조는 질화갈륨 기반 전자소자에서 기본적으로 많이 활용되는 구조이며, 사파이어(Sapphire) 기판 위에 GaN 버퍼(buffer)층, GaN 채널(channel)층, AlGaN 배리어(barrier)층이 성장된 에피탁시(epitaxy)에 게이트(gate), 소스(source), 드레인(drain) 전극을 형성한 구조이다. 에피탁시는 유기화학기상증착장치(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)를 이용하여 성장하며, 사파이어 기판 위에 바로 고품질 AlGaN/GaN 이종접합구조(hetetostructure) 성장할 수 없어 약 2 μm 두께의 GaN 버퍼층을 성장한 다음에 순차적으로 GaN 채널층과 AlGaN 배리어층을 성장한다. 누설 전류를 최소화하기 위하여 버퍼층을 반절연(semi-insulating) GaN으로 구성하고, 고농도의 전자를 가지는 2DEG층을 형성하기 위하여 GaN 채널층과 AlGaN 배리어층을 이용한 이종접합구조로 설계한다. 여기서, AlGaN 배리어층 두께와 Al의 조성비에 따라 AlGaN/GaN 이종접합구조 사이에서의 분극현상(polarization)이 조절되어 전자농도와 전자이동도가 결정된다. 양성자 조사 실험에 위해 제작하였던 소자에서 AlGaN 배리어층과 GaN 채널층 두께는 각각 20 nm와 50 nm이며, AlGaN의 Al 조성비는 약 20%이다. 해당 두께와 조성비는 전산모사 모델링 구조 설계에 반영하였다. 이전 연구에서의 양성자 조사 실험은 5 MeV의 에너지와 10^{15} cm^{-2}의 조사량을 이용하여 진행하였고, 양성자 조사 전후 소자의 게이트-드레인 전류 특성 측정 후 특성 변화에 대하여 분석하였다. 전산모사 모델링 과정에서는 동일한 소자 구조를 설계한 후 양성자 조사 전 소자의 게이트-드레인 전류를 fitting한다. 그 다음에 양성자 조사 후 소자가 받을 데미지(damage)를 고려하여 소자의 게이트-드레인 전류 fitting을 수행하였다.

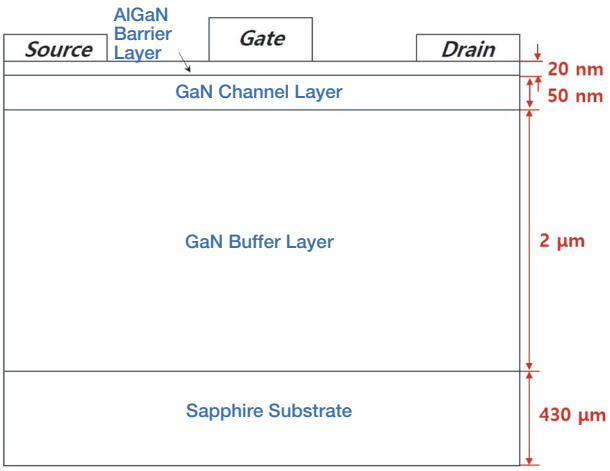

Fig. 1. A schematic of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT.

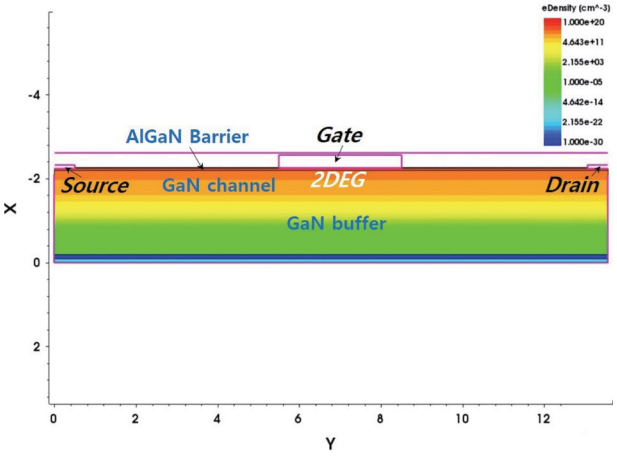

Fig. 2. A simulation result for schematic and electron density distribution of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT.

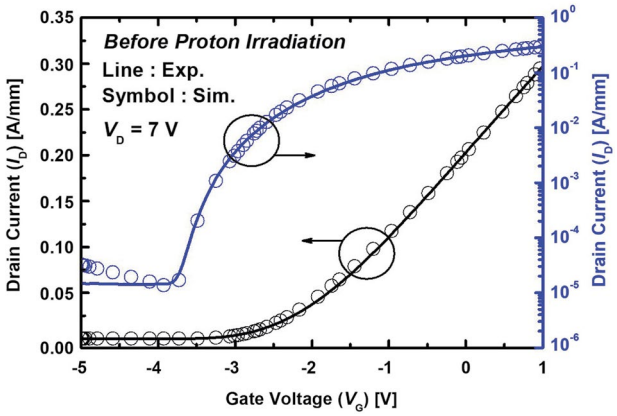

Fig. 3. Experiment and simulation results for drain current (I_D)-gate voltage (V_G) of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT before the proton irradiation at drain voltage (V_D) of 7 V.

2. 전산모사 TCAD 모델 및 파라미터 (parameters)

전산모사 모델링 구조 설계는 반도체 소자 TCAD 시뮬레이터인 Synopsys Sentaurus의 소자 구조 설계 툴(tool)인 Sentaurus Structure Edition (SDE)를 활용하였다. Fig. 2는 SDE로 구현한 AlGaN/GaN HEMT의 단면도와 전자농도 분포를 보여준다. AlGaN 배리어/GaN 채널/GaN 버퍼층 두께는 제작한 소자와 동일하게 각각 20 nm/50 nm/2 μm로 설계하였으며, AlGaN의 Al 조성비는 20%로 설정하였다. 2DEG를 구현하기 위하여 spontaneous/piezoelectric polarization 모델을 추가하였으며, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 AlGaN 배리어/GaN 채널 계면에 높은 전자농도가 분포하는 것을 볼 수 있었다. HEMT의 소자 전류 특성은 2DEG에 의해 생기는 sheet 저항과 contact 저항의 영향을 받으므로, 실제로 얻은 Hall 측정과 TLM 측정 결과를 기반으로 sheet 저항과 contact 저항을 조절하여 양성자 조사 전 소자의 전류 특성을 fitting하였다. 소자 동작 시 발생되는 self-heating 현상을 감안하여 thermodynamic 모델도 추가하였다. HEMT의 경우, 게이트 절연막이 없는 구조이므로 오프 전류(off-state current)는 게이트 누설 전류에 의하여 결정된다. 게이트 누설 전류를 반영하기 위하여 쇼트키 터널링 모델을 추가적으로 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 양성자 조사 전 HEMT의 드레인 전류 특성 Fitting 및 SRIM 시뮬레이션 결과

Fig. 3은 양성자 조사 전 HEMT의 게이트 전압(gate voltage, V_G)에 따른 드레인 전류(drain current, I_D) 특성의 실험 결과를 시뮬레이션으로 fitting한 결과를 보여준다. 실

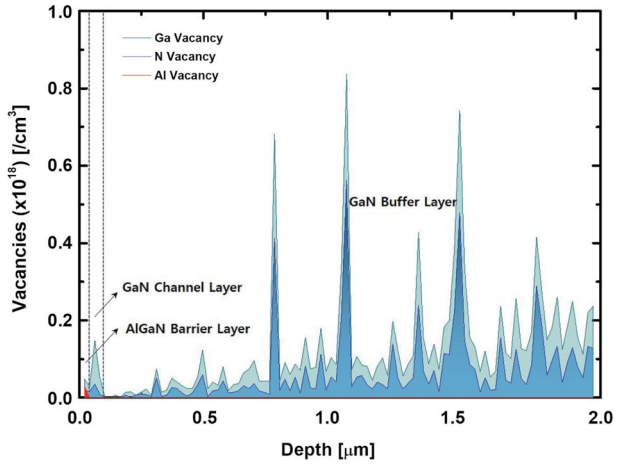

Fig. 4. SRIM simulation results for vacancies in AlGaN/GaN/GaN layers generated after 5 MeV proton irradiation.

험과 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때, fitting이 잘 되었다는 것을 알 수 있다. 전반적인 전류 특성은 2DEG 층의 전자농도와 전자이동도 조절을 통해 맞추었다. 세부적으로 오프상태($V_G < -4$ V)의 전류 값은 schottky tunneling mass를 0.58로 설정하여 조정하였고, 온상태($V_G = 1$ V, $V_D = 7$ V)의 전류에 영향을 미치는 contact 저항값을 $1.3 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot cm^2$로 설정하여 온상태의 전류를 맞추었다. 양성자 조사 후의 전류 특성 모델링은 fitting된 전류 특성에서 양성자 조사 후 받을 수 있는 데미지를 반영하여 수행하였다.

Fig. 4는 질화갈륨 전자소자 구조에 양성자가 주입되었을 때 발생되는 결함(vacancy)에 대한 SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) 시뮬레이션 결과를 보여준다 (Ziegler *et al*. 2010). 5 MeV 에너지를 갖는 양성자는 약 120 μm의 깊이 정도까지 주입되며, AlGaN/GaN 이종접합구조부터 사파이어 기판까지 지나가기 때문에 깊이 측면에서

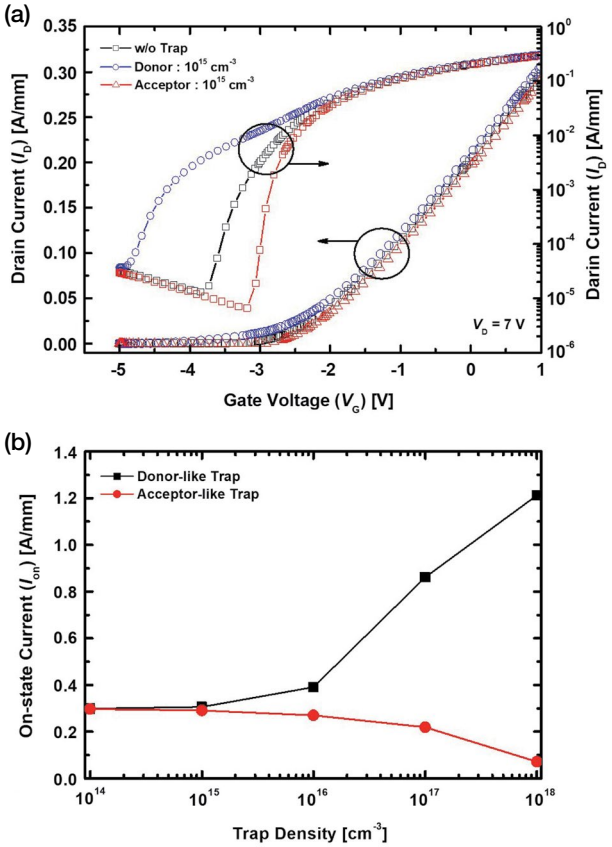

Fig. 5. (a) Effects of donor (N vacancy) and acceptor (Ga vacancy) traps on the drain current (I_D) characteristics of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT. (b) Variation of on-state current (I_{ON}) as a function of donor and acceptor trap density.

는 전체적으로 소자에 영향을 미친다. SRIM 시뮬레이션 결과에 볼 수 있듯이, 주입된 양성자는 많은 Ga vacancy와 N vacancy을 생성시키는 것을 알 수 있다(Lv *et al*. 2010; Polyakov *et al*. 2013). 양성자 조사 후 전류 특성을 fitting하기 위하여 Ga vacancy와 N vacancy 관련 트랩 준위(trap level)를 추가하였으며, 각 층별로 구분하여 vacancy가 미치는 영향을 확인하였다.

2. 양성자 조사 후 생성된 Vacancy에 따른 전류 특성 변화

Fig. 5(a)는 vacancy 종류에 따른 전류 특성 변화를 보여준다. Ga vacancy는 GaN 내 deep acceptor trap (valence band level (E_V) + 1.0 V) 역할로 활동하고, N vacancy는 shallow donor trap (conduction band level (E_C) − 0.06 V)으로 소자에 영향을 미친다(Polyakov *et al*. 2013). 모든 층에 acceptor trap이 반영된 경우, 소자의 문턱전압(threshold voltage)은 양의 방향으로 움직이면서 소자의 전류는 감소하는 것을 확인하였다. 이는 전자들이 acceptor trap에 붙잡히게 되고, 붙잡힌 전자는 전류 흐름을 방해하여 전류 감소

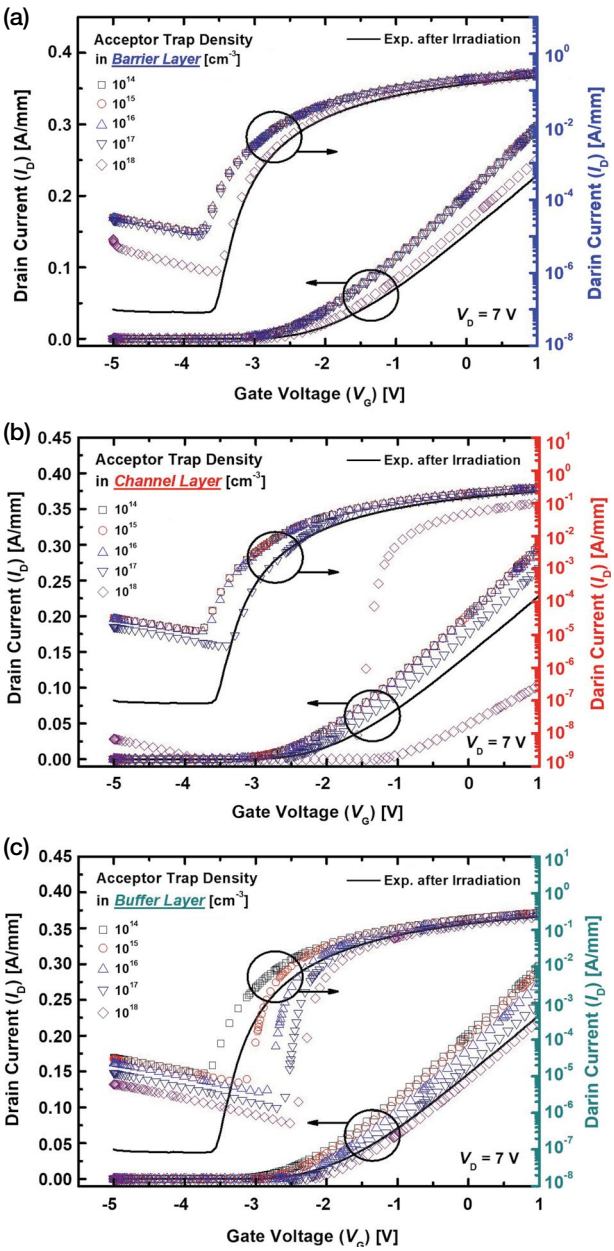

Fig. 6. Variation of the drain current (I_D) characteristics of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT as a function of acceptor (Ga vacancy) trap density in (a) barrier, (b) channel, and (c) buffer layers.

와 문턱전압 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면에 모든 층에 donor trap을 반영하였을 때는 전류가 증가하고 문턱전압이 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 donor trap이 전자를 내놓게 되어 모든 층에서 누설전류가 크게 증가함에 따른 결과로 판단된다. Fig. 5(b)에서 보면, acceptor trap 밀도가 증가할수록 온상태의 전류는 점차 줄어들게 되고, donor trap 밀도가 증가될 경우에는 전류가 상당히 증가하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 4의 SRIM 시뮬레이션 결과에서 양성자가 주입되었을 때에 Ga vacancy가 더 많이 생성되는

것을 볼 수 있었고, 양성자 조사 실험에서 소자의 전류와 문턱전압이 감소되었던 점을 고려하여 acceptor trap이 양성자 조사 후 소자에 영향을 더 크게 미친다고 판단되어 각 층에 Ga vacancy가 분포한 경우에 따른 드레인 전류 특성 변화에 대하여 중점적으로 확인하였다.

Fig. 6(a)는 AlGaN 배리어층에 분포하는 acceptor trap의 밀도에 따른 드레인 전류 특성 변화를 보여준다. Trap 밀도가 10^{17} cm^{-3} 이상으로 증가되었을 때 전류 변화를 보이기 시작하고, 10^{18} cm^{-3}에서는 오프 전류와 온 전류가 크게 감소되며 문턱전압이 증가되는 것을 볼 수 있었다. 실험결과와 비교하였을 때, 문턱전압과 문턱전압 이하의 전류 특성에서 유사한 경향을 보여준다. 채널층에만 acceptor trap이 존재할 경우에는 Fig. 6(b)와 같이 trap 밀도가 10^{16} cm^{-3} 이상으로 증가할수록 오프 전류와 온 전류가 점차 감소되기 시작하고, 배리어층에만 존재할 경우보다 더 큰 전류 감소와 문턱전압 증가를 보여준다. 이는 채널층에 분포하는 acceptor trap이 2DEG 전자농도 감소에 직접적으로 영향을 미치게 되기 때문이다. 실험결과와 비교하였을 때도 문턱전압과 문턱전압 이하의 전류 특성에서 거의 비슷한 경향을 가지며, 채널층의 acceptor trap이 양성자 조사 후 특성에 상당히 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 버퍼층에 acceptor trap이 분포하는 경우에는 배리어층과 채널층에 분포하는 경우와 다소 다른 경향을 보여준다. Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 trap 밀도가 점차 증가되면 문턱전압 이하의 기울기가 급격히 증가하면서 온전류와 오프전류도 함께 점차 감소된다. 버퍼층에 acceptor trap이 증가할 경우, 버퍼층으로 흐르는 누설 전류가 줄어들게 되면서 전체적 전류 값이 감소하는 반면에 문턱전압 이하의 기울기가 증가하게 된다. 결과적으로는 버퍼층 내 acceptor trap 증가에 따른 전류 특성 변화는 양성자 조사 후 측정 결과와 다른 경향으로 나타난다.

3. Contact Resistance / Schottky Tunneling Mass에 따른 영향과 양성자 조사 후 전류 특성 Fitting

양성자 조사 실험 관련 참조문헌에서 양성자 조사 후 vacancy 생성뿐만 아니라 contact resistance가 증가되어 전류 특성이 저하되었다는 실험 결과가 보고된 바 있다(Liu *et al*. 2014; Yoon *et al*. 2021). 그리하여 contact resistance 증가에 따른 드레인 전류 특성 변화를 확인하였으며, Fig. 7에 나타내었다. Contact resistance가 점차 증가할수록 문턱전압 이상의 전류 특성이 감소되는 것을 알 수 있었으며, 문턱전압 이하의 전류 특성에는 크게 영향을 않는 것을 확인하였다. 양성자 조사 후 전류 특성과 비교하였을 때, contact resistance가 크게 변한 경우보다 약간 증가한 경우가 문턱전압 이상의 전류 특성 경향과 비슷하므로 fitting 작업에 반영하였다. HEMT 소자에서는 양성자 주입 후 게이트 누설

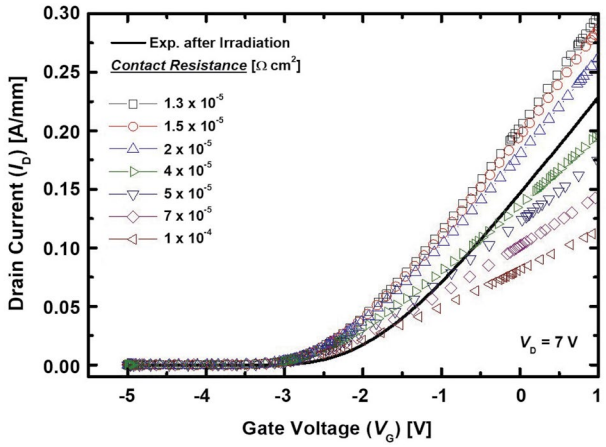

Fig. 7. Impacts of contact resistance on the linear scale drain current (I_D) characteristics of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT.

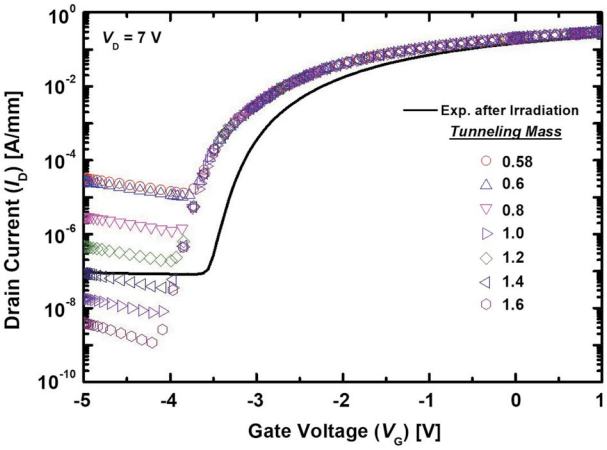

Fig. 8. Impacts of schottky tunneling mass on the logarithmic scale drain current (I_D) characteristics of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT.

전류 변화에 의해 오프 전류도 함께 변화가 일어난다(Kim *et al*. 2016). HEMT의 오프전류는 게이트 누설 전류에 크게 영향을 받으므로 게이트 누설 전류 현상을 고려하여 schottky tunneling 파라미터 중 tunneling mass에 따른 드레인 전류 특성 변화에 대하여 확인하였다. Tunneling mass는 schottky tunneling 확률에 크게 영향을 미치는 파라미터 중에 하나이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 tunneling mass가 증가할수록 오프전류만 점차 감소되는 것을 알 수 있었다. Tunneling mass가 1.0 값을 가질 때, 실험값과 상당히 유사한 것을 확인하였다.

Fig. 9는 최종적으로 양성자 조사 후 HEMT의 게이트 전압에 따른 드레인 전류 특성의 실험 결과를 시뮬레이션으로 fitting한 결과를 보여준다. Acceptor trap 밀도와 분포를 통하여 문턱전압과 문턱전압 이하의 기울기를 조정하였으며,

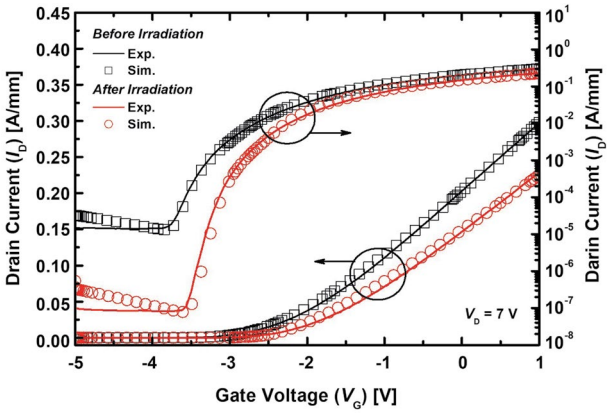

Fig. 9. Experiment and simulation results for drain current (I_D)-gate voltage (V_G) of AlGaN/GaN heterostructure-based HEMT before and after the proton irradiation.

contact resistance 조절을 통하여 문턱전압 이상의 전류 특성을 맞추었다. 그리고 schottky tunneling mass를 증가시켜 게이트 누설전류를 낮추어 소자의 오프 전류를 fitting하였다. SRIM 시뮬레이션의 Ga vacancy 분포를 함께 고려하여 배리어층과 채널층에 $3\times10^{16}\,cm^{-3}$과 $1.3\times10^{17}\,cm^{-3}$의 deep acceptor trap를 각각 설정하였다. 그리고 N vacancy를 고려하여 $1\times10^{16}\,cm^{-3}$과 $3\times10^{16}\,cm^{-3}$의 shallow donor trap도 배리어층과 채널층에 추가하였다. Contact resistance는 양성자 조사 전보다 약간 증가시킨 $2.2\times10^{-5}\,\Omega\cdot cm^2$ 값으로 설정하고 tunneling mass는 0.95로 설정하였다. 모델과 파라미터를 반영한 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 상당히 비슷한 경향을 보여주는 것을 확인하였다.

결 론

본 연구에서는 반도체 소자 TCAD 시뮬레이션를 활용하여 질화갈륨 기반 HEMT의 양성자 영향 평가의 전산모사 모델 개발을 수행하였다. 양성자 조사 전 드레인 전류의 측정 결과와 fitting과정을 진행하여 기본적인 모델과 파라미터를 설정하였다. 양성자 조사 후 소자에서 영향을 받을 수 있는 vacancy, contact resistance, schottky tunneling을 조정하여 드레인 전류 특성 변화를 확인, 최종적으로 양성자 조사 후 실험 결과와 fitting하였다. 실험 결과와 비교하였을 때, 시뮬레이션 결과가 상당히 잘 맞는 것을 확인하였다. 개발한 전산모사 모델을 통하여 질화갈륨 기반 전자소자의 양성자 주입에 따른 특성 변화를 예측할 수 있으며, 정확한 원인 파악을 통하여 질화갈륨 기반 내방사선 소자 및 회로 설계에 도움이 될 것으로 사료된다.

사 사

This work was supported by the KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex) operation fund of KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) and the National Research Foundation of Korea (No. 2018R1D1A1B07051027, 2021M3C1C3097674) by MSIT (Ministry of Science and ICT).

참 고 문 헌

Abbate C, Budatto G, Iannuzzo F, Mattiazzo S, Sanseverino A, Silvestrin L, Tedesco D and Velardi F. 2015. Experimental study of Single Event Effects induced by heavy ion irradiation in enhancement mode GaN power HEMT. *Microelectron. Reliab.* **55**:1496-1500.

Florian C, Cignani R, Santarelli A and Filicori F. 2013. Design of 40-W AlGaN/GaN MMIC High Power Amplifiers for C-band SAR Applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **61**:4492-4504.

Hwang YS, Liu L, Ren F, Polyakov AY, Smirnov NB, Govorkov AV, Kozhukhova A, Kolin NG, Boiko VM, Vereyovkin SS, Ermakov VS, Lo CF, Laboutin O, Cao Y, Johnson JW, Kargin NI, Ryzhuk RV and Pearton SJ. 2013. Effect of electron irradiation on AlGaN/GaN and InAlN/GaN heterojunctions. *J. Vac. Sci. Technol. B* **31**:1-6.

Ionascut-Nedelcescu A, Carlone C, Houdayer A, von Bardeleben HJ, Cantin JL and Raymond S. 2002. Radiation Hardness of Gallium Nitride. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49**:2733-2738.

Keum D and Kim H. 2018. Energy-Dependent Degradation Characteristics of AlGaN/GaN MISHEMTs with 1, 1.5, and 2 MeV Proton Irradiation. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **7**:Q159-Q163.

Kim BJ, Ahn S, Ren F, Pearon SJ, Yang G and Kim J. 2016. Effects of proton irradiation and thermal annealing on off-state step-stressed AlGaN/GaN high electron mobility transistors. *J. Vac. Sci. Technol. B* **34**:1-7.

Kim DS, Lee JH, Kim JG, Yoon YJ, Lee JS and Lee JH. 2020. Anomalous DC Characteristics of AlGaN/GaN HEMTs Depending on Proton Irradiation Energies. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **9**:1-4.

Kim DS, Kim JG, Lee JH, Hwang YS, Yoon YJ, Lee JS, Bae Y and Lee JH. 2021. Mechanism of Proton-Induced electrical degradation of AlGaN/GaN high electron mobility transistors. *Solid State Electron.* **175**:1-5.

Liu L, Hwang YH, Xi Y, Ren F, Craciun V, Pearton SJ, Yang G, Kim HY and Kim J. 2014. Study on the effects of proton ir-

radiation on the dc characteristics of AlGaN/GaN high electron mobility transistors with source field plate. *J. Vac. Sci. Technol. B* **32**:1-6.

Lv L, Ma JG, Cao YR, Zhang JC, Zhang W, Li L, Xu SR, Ma XH, Ren XT and Hao Y. 2011. Study of proton irradiation effects on AlGaN/GaN high electron mobility transistors. *Microelectron. Reliab.* **51**:2168-2172.

Mishra UK, Parikh P and Wu YF. 2002. AlGaN/GaN HEMTs-An overview of device operation and applications. *Proc. IEEE.* **90**:1022-1031.

Muraro JL, Nicolas G, Nhut DM, Forestier S, Rochette S, Vendier O, Langrez D, Cazaux JL and Feudale M. 2010. GaN for space application: Almost ready for flight. *Int. J. Microw. Wireless Technol.* **2**:121-133.

Polyakov AY, Smirnov NB, Govorkov AV, Kozhukhova EA, Pearton SJ, Ren F, Liu L, Johnson JW, Lim W, Kolin NG, Veryovkin SS and Ermakov VS. 2012. Comparison of neutron irradiation effects in AlGaN/AlN/GaN, AlGaN/GaN, and InAlN/GaN heterojunctions. *J. Vac. Sci. Technol. B* **30**:1-7.

Polyakov AY, Pearton SJ, Frenzer P, Ren F, Liu L and Kim J. 2013. Radiation effects in GaN materials and devices. *J. Mater. Chem. C* **1**:877-887.

Ueda T, Ishida M, Tanaka T and Ueda D. 2014. GaN transistors on Si for switching and high-frequency applications. *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**:1-8.

Waltereit P, Bronner W, Quay R, Dammann M, Casar M, Muller S, Reiner R, Bruckner P, Kiefer R, van Raay F, Kuhn J, Musser M, Haupt C, Mikulla M and Ambacher O. 2013. GaN HEMTs and MMICs for space applications. *Semicond. Sci. Technol.* **28**:1-7.

Weaver BD, Anderson TJ, Koehler AD, Greenlee JD, Hite JK, Shahin DI, Kub FJ and Hobart KD. 2016. On the Radiation Tolerance of AlGaN/GaN HEMTs. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **5**:Q208-Q212.

Yoon YJ, Lee JS, Suk JK, Kang IM, Lee JH, Lee EJ and Kim DS. 2021. Effects of Proton Irradiation on the Current Characteristics of SiN-Passivated AlGaN/GaN MIS-HEMTs Using a TMAH-Based Surface Pre-Treatment. *Micromachines.* **12**:1-10.

Ziegler JF, Ziegler MD and Biersack JP. 2010. SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010). *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms.* **268**:1818-1823.

Received: 1 December 2021
Revised: 14 December 2021
Revision accepted: 14 December 2021