

GaAs 공정 기반 RF 수동소자 및 pHEMT의 TID 방사선 영향 분석

Total Ionizing Dose Effects on Gallium Arsenide Process Radio Frequency Passive Components and Pseudomorphic High-Electron-Mobility Transistors

김 강 현¹ · 김 민 수²

KangHyeon Kim¹ · Min-Su Kim²

요 약

본 연구는 GaAs 공정 기반 인덕터, ELC 커패시터, 저항, pHEMT에 대해 25, 100, 300 krad TID 조사 전후 특성을 비교하였다. 인덕터는 인덕턴스 변화가 2 % 이내로 가장 안정적이었다. 커패시터는 유효 커패시턴스가 최대 50 % 이상 증가하여 가장 큰 민감도를 보였으며, ESR 변화는 작아 용량 변화에 따른 매칭 주파수 이동이 주요 영향으로 분석되었다. 저항은 두 저항값 모두 3 % 이하의 작은 변화를 보였으며, pHEMT는 바이어스 조건에 따라 1~10 % 범위의 ID 변화를 보였으나, 300 krad에서는 일부 조건에서 ID가 오히려 증가하는 비단조적 변화가 관찰되었다. 이 결과는 사용된 pHEMT 소면적(4×50 μm) 구조로 변화가 제한적이지만, 전력증폭기와 같은 대면적 소자를 사용할 경우, 전류 증가의 열화가 더 커질 것으로 예상된다.

Abstract

This study compared the pre- and post-total ionizing dose (TID) characteristics of GaAs-based inductor, ELC capacitor, resistor, and pHEMT under 25, 100, and 300 krad irradiation. The inductor exhibited the highest stability with an inductance variation within 2 %. The ELC capacitor exhibited the greatest sensitivity, with the effective capacitance increasing by more than 50 %, while the ESR remained small, indicating that the TID mainly caused matching-frequency shifts driven by capacitance changes. Both the resistor types exhibited a variation of <3 %. The pHEMT exhibited a 1~10% drain-current variation depending on the bias, and at 300 krad, a non-monotonic behavior was observed, where ID increased under specific bias conditions. These results indicated that the limited variation observed in the small-area pHEMT (4×50 μm) reflected its device size; larger power amplifier devices are expected to experience more pronounced TID-induced current degradation.

Key words: Total Ionizing Dose (TID), GaAs RF Devices, Passive, pHEMT, Radiation Effects

「본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과이다 (2025-RISE-14-001).」

「이 논문은 2025년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2024-00451036).」

「이 논문은 2025년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2025-25395494).」

본 연구에서 방사선 조사의 기회를 주신 한국원자력연구원의 강창구 박사님과 국립목포대학교 황현준 박사님께 깊이 감사드립니다.

국립목포대학교 반도체공학과(Department of Semiconductor Engineering, Mokpo National University)

1: 학부연구원(<https://orcid.org/0009-0004-0444-5311>), 2: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-7566-5408>)

· Manuscript received November 29, 2025 ; Revised December 7, 2025 ; Accepted December 8, 2025. (ID No. 20251129-148)

· Corresponding Author: Min-Su Kim (e-mail: mamy970@mmu.ac.kr)

I. 서 론

저궤도(LEO) 환경에서는 다양한 방사선에 지속 노출되며, 그중 총 이온화 선량(TID)은 전자회로에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^[1]. 실리콘 기반 메모리 소자는 수 krad 이상의 TID에서 문턱전압·누설 전류·동작 타이밍 변화 등이 보고되었고^{[1][2]}, 디지털·아날로그·전력회로 및 광학소자 등에서도 방사선 영향 분석이 활발히 이루어지고 있다^{[3][5]}.

GaAs·GaN 기반 III-V 소자에서도 방사선 영향에 대한 소자 수준 연구가 다수 보고되고 있으나, 연구들은 주로 능동소자의 전류 특성 변화·문턱전압 이동·계면 트랩 생성 등 물리적 열화 메커니즘에 집중되어 있다^{[6]-[8]}. 이는 대부분 단일 소자 특성 분석에 머무른 상황이며, 방사선에 따른 파라미터 변화가 실제 회로에 미치는 영향은 충분히 다뤄지지 않고 있다. 특히 RF 회로의 핵심 구성요소인 인덕터·커패시터·저항 등의 수동소자에 대한 TID 비교 연구는 매우 제한적이다.

이에 본 연구에서는 GaAs 공정 기반으로 제작된 인덕터, ELC(edge-lift capacitor), thin-film 저항 및 pHEMT 소자를 대상으로 25, 100, 300 krad 조건에서 TID 조사 전·후 특성을 비교하여, 화합물 기반 소자의 회로 관점에서의 방사선 민감도를 정량적으로 분석하고자 한다.

II. 소자 구조 및 측정 조건

본 연구에 사용된 칩은 상용 Win-semi사의 PP10-15 0.1- μm InGaAs 공정 기반의 다이(die)-레벨 테스트 칩으로, 인덕터, 커패시터, thin-film 저항, pHEMT가 집적되어 있다. 인덕터는 상부 금속층을 이용한 square spiral 구조이며, 커패시터는 금속 단부(edge) 전계 집중을 이용한 고주파용 ELC(edge-lift capacitor) 구조를 사용하였다(그림 1). 저항은 박막 저항 층(thin-film resistor) 기반이며, pHEMT는 단일 게이트 GaAs 소자이다. 칩은 개별 다이로 분리 후 패키징 없이 고주파 프로브로 측정하였으며, DUT-open-short 패턴을 이용해 de-embedding 하여 S-파라미터를 추출하고 총 9개의 샘플로 평가하였다.

TID 조사는 Co-60 감마선 원을 이용해 150 cm 거리에서 25, 100, 300 krad 조건으로 수행했으며, 모든 소자는 조사 동안 바이어스를 인가하지 않았다. 조사 후 안정화 시간을

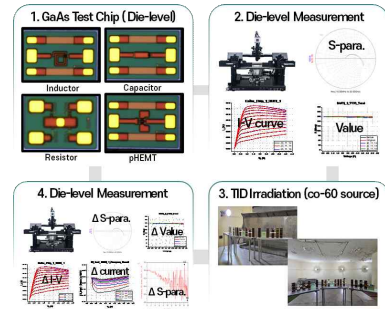


그림 1. 테스트 칩의 소자와 다이-레벨 측정 구성도
Fig. 1. Device of the test chip and the die-level measurement setup.

거쳐 전기적 특성을 측정하였다. 인덕터와 커패시터는 VNA로 S-파라미터를 측정하고, L_{eff} , Q-factor, C_{eff} , ESR을 추출하여 회로적 관점에서 비교하였다. 저항은 DC 파라미터 분석기로 저항값 변화를 측정하였으며, pHEMT는 I-V($V_{\text{GS}} - I_{\text{D}}$, $V_{\text{DS}} - I_{\text{D}}$) 특성을 측정해 drain current(I_{D}) 변화를 분석하였다. 모든 측정은 동일 조건에서 반복 수행되었고, 변화는 TID에 따른 상대 변화율로 정량화하였다.

III. 측정 및 분석

그림 2는 인덕턴스와 Q의 TID 전후 특성을 비교한 것이다. 9개 샘플 평균 기준 인덕턴스 변화는 모든 선량에서 3% 이내였으며, 최대 변동은 25, 100, 300 krad에서 각각 4, 6.8, 4% 수준이었다. Q는 10 GHz 이하에서 거의 변화가 없었고, 고주파 영역의 변동은 측정 기생 영향으로 판단된다. 회로적으로 이러한 변화는 공진 주파수 이동이 매우 작아 매칭 성능에 미치는 영향이 미미하며, 인덕터는 TID에 대해 안정적인 수동소자로 판단된다.

그림 3은 ELC 커패시터의 유효 커패시턴스(C_{eff})와 ESR을 TID 전후로 비교한 결과이다. C_{eff} 는 25 krad에서 약 9%(0.49 pF) 증가하였고, 100 및 300 krad에서는 각각 56.7%(3.23 pF), 57.6%(3.28 pF)로 큰 변화를 보였다. 반면 ESR은 조사 전 거의 0 Ω 에 가까웠고, 조사 후에도 25, 100, 300 krad에서 각각 0.27, 0.38, 0.38 Ω 으로 증가하여 절댓값 기준의 변화는 작았다. 기준 ESR이 0 Ω 가까워 상대 변화율(%)은 의미가 없어, 절댓값 증가를 중심으로 분석하였다. 회로적 관점에서 이러한 C_{eff} 변화는 매칭

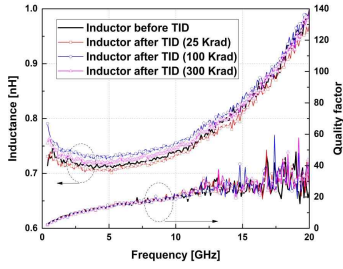


그림 2. 인덕턴스와 Q의 TID 전후 비교
Fig. 2. Inductance and Q comparison before and after TID.

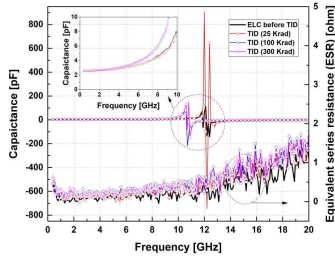


그림 3. 커패시턴스 및 ESR의 TID 전후 비교
Fig. 3. Comparison of cap. and ESR before and after TID.

및 필터 회로의 공진 주파수 이동($f_0=1/\sqrt{LC}$)에 직접 영향을 주는 요소이며, 선량이 증가할수록 커패시터의 유효 용량이 커짐에 따라 회로의 중심 주파수가 낮아지는 방향의 변화를 유발할 수 있다. 반면 ESR 변화는 수십 m Ω 수준으로 측정되어 고주파 손실 증가나 삽입손실 열화에는 큰 영향을 주지 않는 수준으로 판단된다.

그림 4는 174 Ω 와 514 Ω 저항의 TID 전후 변화를 나타낸다. 174 Ω 소자는 25, 100, 300 krad에서 각각 0.59% ($\approx 1 \Omega$), 1.18% ($\approx 2 \Omega$), 1.18% ($\approx 2 \Omega$)의 작은 변화를 보였고, 514 Ω 소자도 0.39% ($\approx 2 \Omega$), 2.58% ($\approx 13 \Omega$), 2.37% ($\approx 12 \Omega$)로 3% 이하로 작은 변화만 나타났다. 변화는 저선량에서 증가하나 고선량에서는 포화되는 경향을 보였으며, 측정 전압이 높을 때는 전계 효과로 저항이 오히려 감소하는 현상도 관찰되었다. 회로적 관점에서 이러한 수% 이내의 저항 변화는 바이어스 네트워크, 게이트/드레인 저항, 또는 필터·감쇠 네트워크에서의 동작에 사실상 큰 영향을 미치지 않는 수준이라 판단된다. 따라서 GaAs 기반 thin-film 저항은 TID 환경에서 안정적인 수동소자임을 확인할 수 있다.

그림 5는 TID 전후의 pHEMT I-V 곡선을 나타낸 것으

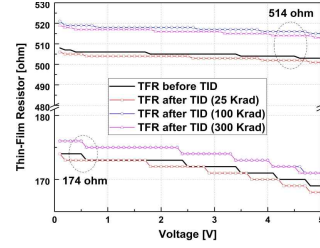


그림 4. 174 Ω 및 514 Ω 저항의 TID 전후 변화 비교
Fig. 4. TID-induced variation of 174- Ω and 514- Ω resistors.

로, 곡선 간 격차가 작아 정량 비교가 어려워 그림 6에서 $\Delta I_d(\%)$ 를 V_{GS} 조건별로 비교하였다. 낮은 V_{DS} 영역에서는 TID에 따라 최대 약 12%의 I_d 증가/감소가 관찰되었지만, 실제 회로에서 주로 사용하는 $V_{DS}=3\sim 4$ V 영역에서는 변화가 크지 않음이 관찰되었다.

표 1은 V_{DD} 전압이 3~4 V 구간에서 TID에 따른 I_d 변화율을 나타낸다. 25 및 100 krad에서는 I_d 감소 경향이 나타났으나, 300 krad에서는 일부 바이어스 조건에서 증가로 전환되는 비단조적 특성이 관찰되었다. 이는 유전체 (SiN_x) 트랩의 증가와 포화로 인한 전류 감소와 증가로 보인다. 이는 실제 V_{th} 가 낮아지는 효과로 gm과 바이어스 점을 변동시켜 회로 성능에 영향을 줄 수 있다. 특히 300 k에서 나타난 I_d 증가 경향은 고출력 PA에서 안정도나 전력 소비 증가로 이어질 수 있을 것으로 생각된다. 또한 pHEMT(4 \times 50) 면적 소자로 변화가 크지 않지만, PA용 대면적 소자에서는 더 큰 전류 민감도가 예상된다.

IV. 결론

본 연구에서는 GaAs 공정을 기반으로 제작된 수동소

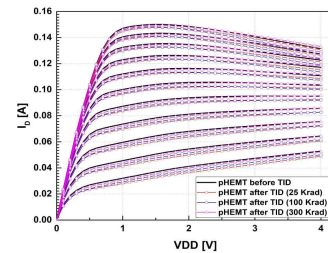


그림 5. TID 전후의 pHEMT I-V 특성
Fig. 5. pHEMT I-V curves before and after TID.

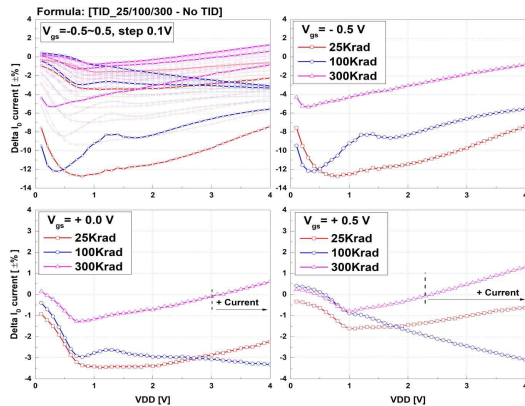


그림 6. VGS별 Id 변화율(%) 비교
 Fig. 6. Id variation (%) versus V_{gs} under different TID levels.

표 1. pHEMT의 TID별 Id 변화율($V_{DD}=3\sim 4V$)
 Table 1. Id variation of pHEMT under TID.

TID (Krad)	$V_{gs}=-0.5\text{ V}$	$V_{gs}=0\text{ V}$	$V_{gs}+=0.5\text{ V}$
25 (%)	-9.75	-2.87	-1.02
100 (%)	-6.61	-3.32	-3.09
300 (%)	-1.86	+0.62	+1.29

자 및 pHEMT의 TID 민감도를 비교하여, 각 소자가 RF 회로에서 어떤 방식으로 방사선 영향을 나타내는지 회로 관점에서 정리하였다. 분석 결과, 인덕터와 저항은 고주파 특성과 DC 특성이 TID 증가에 대해 거의 변하지 않아, GaAs 기반 회로에서 구조적·전도 경로의 안정성이 높음을 확인하였다. 반면 ELC 커패시터는 용량 변화가 크게 나타나 주파수 응답과 매칭 조건을 변화시키는 주요 요인으로 확인되었으며, 이는 GaAs RF 회로에서 가장 신중하게 고려해야 하는 요소임을 시사한다. pHEMT는 소면적 구조에서는 변화가 제한적이었으나, 선량 및 바이어스에 따라 비 단조적 Id 변화를 보였으며, 이는 대면적·고전력 소자의 큰 전류 소비 조건에서는 더 크게 확대될 수 있어 매칭 변화에 영향을 미칠 수 있게 된다. 이와 같은 결과는 GaAs 기반 RF 회로에서 TID 거동이 소자 구조에 따라 명확히 차별화됨을 보여주며, 특히 커패시터 중심의 설계 마진 확보, 능동소자 바이어스 안정성 검증, 대면적 소자의 추가 검증 필요성 등 우주 환경 설계 시 고려해야 할 초기 설계에 고려할 변화조건을 제시한다. 본 연구는 GaAs RF 회로의 방사선 신뢰성 확보를 위한 기초 데이터

를 제공하며, 향후 MMIC 단위의 회로 모델링 및 시스템 수준 신뢰성 평가로 확장될 수 있다.

References

- [1] K. A. LaBel, "Radiation effects on electronics 101: Simple concepts and new challenges," 2004. Available: https://nepp.nasa.gov/DocUploads/392333B0-7A48-4A04-A3A72B0B1DD73343/Rad_Effects_101_WebEx.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [2] X. Zheng, Y. Wang, R. Mo, C. Liu, T. Wang, and M. Huo, et al., "Total ionizing dose effects in advanced 28 nm charge trapping 3D NAND flash memory," *Electronics*, vol. 14, no. 3, p. 473, Jan. 2025.
- [3] P. E. Dodd, L. W. Massengill, "Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, pp. 583-602, Jun. 2003.
- [4] X. Chen, Y. Xu, R. Cao, B. Mei, H. Liu, and W. Zhou, et al., "Effects of electron irradiation and thermal cycling on electrical properties of SiC MOSFET," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 25, no. 3, Sep. 2025.
- [5] S. Beaumont, J. M. Lauenstein, J. S. Adams, S. R. Bandler, J. A. Chervenak, and F. M. Finkbeiner, et al., "Effect of space radiation on transition-edge sensor detectors performance," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 5, p. 2101606, Aug. 2023.
- [6] S. E. Zhao, S. Bonaldo, P. Wang, E. X. Zhang, N. Waldron, and N. Collaert, et al., "Total-ionizing-dose effects on InGaAs FinFETs with modified gate-stack," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 67, no. 1, pp. 253-259, Jan. 2020.
- [7] L. Lv, P. Li, X. Ma, L. Liu, L. Yang, and X. Zhou, et al., "Fast and thermal neutron radiation effects on GaN PIN diodes," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 64, no. 1, pp. 643-647, Jan. 2017.
- [8] S. Hou, S. Dong, J. Yang, Z. Liu, E. Guan, and J. Liu, et al., "Proton irradiation effects on dual delta-doped AlGaAs/InGaAs/AlGaAs pseudomorphic high-electron-mobility transistors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 71, no. 9, pp. 2067-2076, Sep. 2024.