

M&S 기반 반도체소자의 펄스감마선 피해평가 시스템 구축 연구

A Study on Implementation of a Transient Radiation Effects on Electronics(TREE) Assessment System Based on M&S

이 남 호* · 이 승 민†
(Nam-Ho Lee · Seung-Min Lee)

Abstract - To simulate the effect of high dose-rate radiation on semiconductor devices, device modeling work has been performed especially in the area of photo-current generation by a PIN diode. The resultant analytical values were compared with experimental ones that were specially designed and performed to benchmark the simulation results. Initial results showed 27.85% error between the simulation and the experiment. The error can be further reduced by improvement both in simulation and in related experiments. The developed technique from the study can be applicable to radiation dosimetry and to analysis on the radiation effects in electronics.

Key Words : Pulse radiation, Damage effect, Assessment system, Analysis model, Gamma-radiation, Dose rate

1. 서 론

핵폭발 시 발생하는 펄스방사선은 군 전자장비에 심각한 손상을 유발하게 되는데, 이를 펄스방사선효과(Transient Radiation Effects on Electronics, TREE)[1] 라 한다. 핵폭발에 의한 군 전자장비의 심각한 피해는 주로 초기에 발생하는 높은 에너지와 선량을 가지는 즉발 감마 펄스선(prompt gamma pulse)[2]에 기인한다고 알려져 있다. 핵폭발 후 초기에 고속으로 전달되는 감마 펄스방사선은 전자소자/장비에 Upset, Latchup, Burnout[3] 등에 영향을 미치며, 심각한 경우 복구 불가능한 심각한 손상을 일으키거나 전자장비의 전체 기능 마비로 이어지기도 한다.[4]

펄스방사선 피해를 분석하고 대비하는 기술은 대부분 미국과 유럽 등 국방기술 선진국에서 군 무기체계뿐만 아니라 민간산업의 통신 및 전력시설 등 국가 기간망의 피해를 최소화하기 위해 오랜 기간을 거쳐 연구개발해 오고 있다. NASA[5]나 SNL(Sandia National Laboratory)[6]과 같은 방사선 관련 국가연구기관에서는 우주방사선이나 핵폭발에서 방출되는 펄스형 방사선에 대한 연구와 함께 다양한 반도체 소자에 대한 펄스 방사선 피해현상 실측연구를 수행하고, 그 결과를 축적하여 데이터베이스로 관리해오고 있다.

최근의 연구는 인공위성이나 무기체계에 사용되는 다양한 종류의 전자소자에 대한 핵방출 펄스방사선의 피해현상을

효율적으로 분석하기 위해 반도체 소자의 3D 모델에 펄스방사선의 수치적 입력모델 함수를 적용하여 피해 특성을 정밀하게 분석하는 피해평가 모델 기반 ‘펄스방사선 피해평가 체계’ 개발에 역량이 집중되는 추세이다. 특히 Bipolar 소자의 고선량 펄스방사선 영향 모델링, MOSFET의 과도방사선 응답[7], 양자에 의한 집적회로의 Latchup[8], 내방사선 SOI 집적회로의 이온화 펄스 모델링[9], 단일현상에 대한 다중 트랜지스터 영향[10] 등에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이 피해평가 체계는 현실적으로 한계가 있는 전체 소자에 대한 펄스방사선의 실측시험이 없이도 피해평가 모델을 대상으로 펄스 방사선에 대한 신뢰성 있는 분석이 가능한 장점이 있다. 즉, 초기 모델 구축 후 펄스방사선의 조건과 반도체 구조, 물성 및 공정 등의 특성이변이 용이하여, 서로 다른 방사선 조건 및 다양한 종류의 반도체 소자에 대한 정성적인 펄스방사선의 피해예측이 가능하다.[11]

이에 따라, 본 논문에서는 PIN 다이오드를 대상으로 펄스방사선 영향을 실측시험과 모델링·시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 비교 검증하는 ‘펄스방사선의 반도체 피해평가 체계 구축 연구’를 국내에서 처음으로 수행하였다. 먼저 반도체 공정을 통해 설계 제작한 PIN 다이오드를 핵방출 방사선과 유사한 펄스형 감마 방사선을 세기별로 조사하면서 출력되는 순간 전류값을 측정하였다. 다음으로 동일한 공정설계 변수의 PIN 다이오드 3D 모델에 실측에서 사용된 펄스와 유사한 펄스모델을 단계적으로 입력한 후 소자 내부에서 생성된 순간전하의 움직임 패턴을 분석하고 출력 전류값을 시뮬레이션하였다. 이상의 두 과정에서 얻은 실측시험의 PIN 다이오드 출력 전류값들과 3D 모델 출력전류 시뮬레이션 결과를 비교 검증함으로써 반도체에 대한 펄스방사선의 피해를 체계적으로 분석하고 예측할 수 있는 ‘피해평가모델 구축’에 관하여 논하였다.

* Dept. of Nuclear Convergence Technology Development
Korea Atomic Energy Research Institute, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electric, Electronics &
Communication Engineering Education, Chungnam National
University, Korea

E-mail : zbus@cnu.ac.kr

Received : April 19, 2013; Accepted : June 25, 2013

2. 본 론

2.1 PIN 다이오드 3D 모델링 및 공정제작

펄스방사선 실측시험과 모델링·시뮬레이션(M&S)에 사용될 PIN 다이오드는 동일한 특성변수로 반도체 공정상에서 제작하고 M&S 툴에서 모델링하였다. 그림 1은 반도체 공정 설계와 특성분석 전문 프로그램인 TCAD로 PIN 다이오드를 3차원으로 모델링한 것으로서 내부구조 모델과 외형을

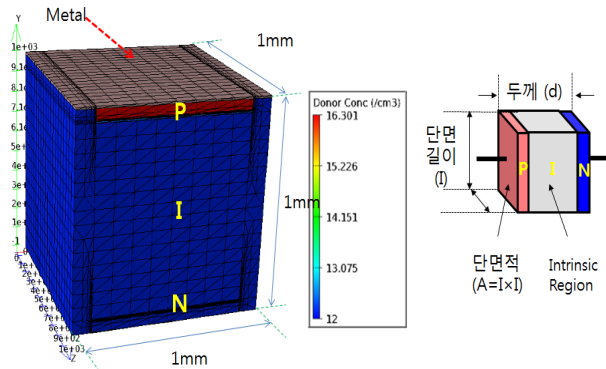


그림 1 M&S 분석 및 실측평가 시험용 PIN다이오드 3차원 모델의 구조

Fig. 1 PIN Diode 3-D structure for the M&S and the radiation test evaluation

표 1 PIN 다이오드 공정 조건

Table 1 Fabrication conditions for PIN diode

| Wafer 종류 및 결정방향 | n-type (111) |
|----------------------------|--------------------|
| 두께(μm) | 1.0 |
| I층 농도 (Wafer 비저항: Ω·cm) | 3,000 |
| Dopant (Front side : B) | 2×10 ¹⁶ |
| Dopant (Back side : Ph) | 2×10 ¹⁶ |
| 면적(mm ²) | 1.0 × 1.0 |

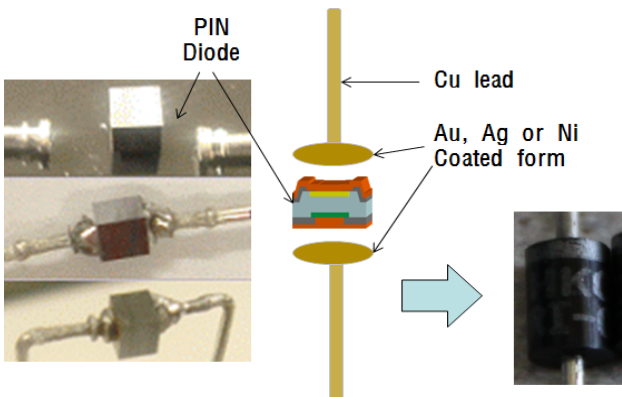


그림 2 PIN 다이오드 공정제작 및 실물

Fig. 2 The fabrication process and the outer shape of the PIN diode

보여주고 있다. 여기에 사용된 반도체 공정변수의 조건은 표 1과 같으며, 이 공정조건에 따라 실제 반도체 공정에서 제작한 소자는 그림 2와 같이 방사선 빔의 조사방향에 따른 의존성(Angular dependancy)을 최소화한 정방형(1.0×1.0×1.0 mm³)의 구조를 가지고 있다.

2.2 펄스방사선 실측시험을 통한 PIN 다이오드 피해현상 분석

제작된 PIN 다이오드에 대한 펄스방사선 시험은 포항공기속기연구소(PAL)의 전자빔가속기(Test LINAC)에서 텅스텐을 이용하여 변환된 감마방사선을 세기별로 조사하는 과정이었다. 샘플 PIN 다이오드는 DC 성분을 제거하기 위한 RC 회로로 제작된 DUT 보드에 장착된 후 펄스빔에 조사되었으며, 각각의 빔 세기를 정밀하게 계측하기 위해 TLD를 후면에 부착하여 그림 3과 같이 출력되는 광전류 신호와 실제 인가된 선량률 값을 확인할 수 있도록 구성하였다.

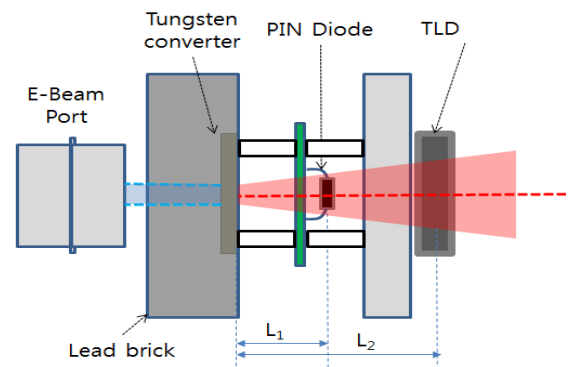


그림 3 PIN 다이오드 소자의 펄스방사선 실측시험 구성

Fig. 3 The irradiation test configuration for the PIN diode

텅스텐 변환기로부터 출력되는 펄스감마선은 그림 3과 같이 일정각도의 방사 형태로 방출되기 때문에 단위 면적당 조사되는 선량은 선원향으로 부터의 거리에 반비례하게 된다. 그러므로 TLD에 누적된 선량 측정값을 기준으로 PIN 다이오드에 조사된 선량률을 측정하기 위해서는 설치위치에 따른 감쇠율을 보정하여야 한다. 본 실험에서 PIN 다이오드와 TLD 설치 위치는 텅스텐 변환기로부터 각각 20mm, 45mm이며 두 위치의 상대적 감쇠비는 식 1과 그림 4에 의해 약 5.06임을 알 수 있다.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} = \frac{(\tan(\theta_1) \times L_2)^2}{(\tan(\theta_1) \times L_1)^2} = \frac{L_2^2}{L_1^2} = \frac{2025}{400} = 5.0625 \quad (1)$$

감쇠인자를 고려하여 PIN 다이오드의 출력 광전류로부터 얻은 펄스방사선의 선량률은 7.05×10⁷rad(Si)/sec~5.02×10⁸ rad(Si)/sec 범위였고, 이때의 출력 광전류 최대값으로 나타낸 그래프는 그림 5와 같다. 조사된 펄스방사선의 선량률과 PIN 다이오드 출력 광전류는 선형적 특성관계를 보여주고 있으며, 3.0×10⁸ rad(Si)/sec 이상에서는 증가율 감쇠현상이 나타났다.

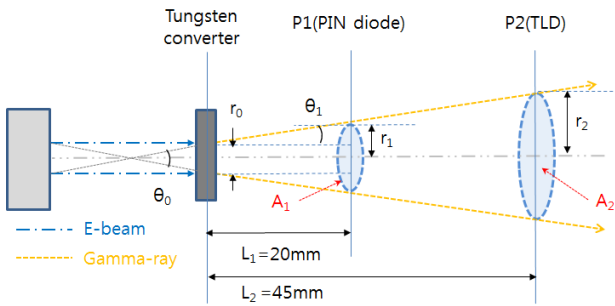


그림 4 TLD를 이용한 PIN 다이오드의 조사선량 보정
Fig. 4 The radiation dose calibration for the PIN diode using TLD

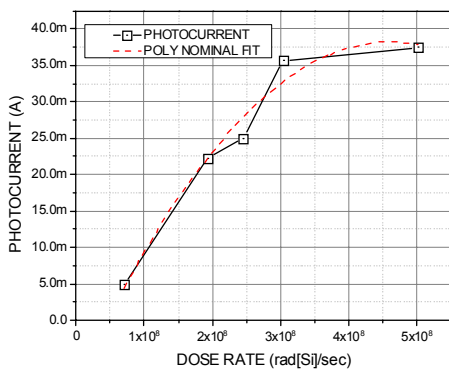


그림 5 펄스감마선 선량률 vs. 소자 출력전류 상관관계
Fig. 5 The correlation between the gamma-ray dosage and the output current of the PIN diode

2.3 펄스방사선 신호의 PIN 다이오드 모델에 대한 피해 현상 시뮬레이션

실측에서 사용된 PAL Test LINAC의 펄스방사선 선량률은 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 에서 시작되었기에 PIN 다이오드 모델에 대한 특성 시뮬레이션도 실측과 동일한 세기의 입력방사선을 기준으로 설정하였다. 반도체 소자의 실리콘 매질에서 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 의 에너지를 받을 때 발생하는 전자 정공쌍 (Electron Hole Pairs: EHPs)을 에너지로 변환하면

$$1 \times 10^8 \text{ rad/s (Si)} = 2.33 \times 10^3 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{s} \quad (2)$$

이 에너지에 의해 발생하는 전자 정공쌍의 수는 EHP 생성에너지(3.6eV)로 나누면

$$4.04 \times 10^{21} \text{ EHPs/cm}^3 \cdot \text{s} \quad (3)$$

계산된 전자 정공쌍의 수로부터 입사 방사선량을 도출하면 광 입사 시 순간 방사광 선량에 의하여 발생하는 전자 정공쌍의 수는 다음 식을 따른다.

$$G = \frac{\alpha P_0}{h\nu} \cdot \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

여기서, G는 전자 정공쌍의 생성율, P_0 는 입사된 빛의 세기로 단위면적당 입사되어야 하는 선량, h는 플랑크 상수, v는 빛의 주파수를 나타낸다.

식 2와 3으로 부터 P_0 값은 $8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 로 계산되므로, 결국 $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 의 감마선은 $8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 의 단위 면적당 입사 선량으로 변환됨을 알 수 있다.[12]

실측에서 사용된 펄스방사선의 기준선량, $1 \times 10^8 \text{ rad/s}$ 값을 TCAD에서 설계된 3D 모델의 입력 펄스광 입력정보로 사용하려면 단위 면적당 에너지($W = 8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$)가 요구되며 이와 함께 필요한 추가 변수를 표 2에 정리하였다. 3D 모델의 입력펄스는 약 1μs로 실측과 유사한 직사각형의 펄스 형태로 인가하였다.

표 2 과도 감마선 시뮬레이션 입력변수

Table 2 Input parameters for the simulation

| Parameters | Values |
|--|------------------------------------|
| Index of refractivity (silicon, real) | 1 |
| Index of refractivity (silicon, imaginary) | 8×10^{-13} |
| Wave length | $1 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ |
| Input angle | 90° |
| Gamma photon energy | 1.24 MeV |
| Absorption coefficient | 0.1/cm |
| Minimum power | $8.868 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ |

그림 6은 3D 모델의 PIN 다이오드에 입력된 수치적 모델의 펄스방사선에 대한 출력 광전류의 TCAD 시뮬레이션 출력값을 펄스방사선 세기별로 나타난 결과 그래프이다. 이 값을 조사 선량률에 대한 출력 광전류의 그래프로 나타낸 그림 7로 부터 펄스방사선 조사 선량률과 출력광전류의 시뮬레이션 결과는 선형적 비례특성에 있음을 알 수 있다.

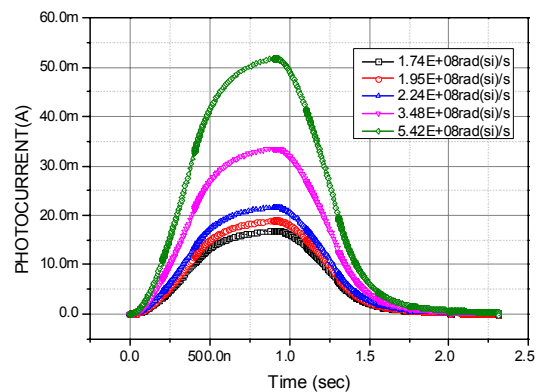


그림 6 펄스감마선 세기별 광전류 시뮬레이션 결과
Fig. 6 The simulation result of the photocurrent to the dose rate

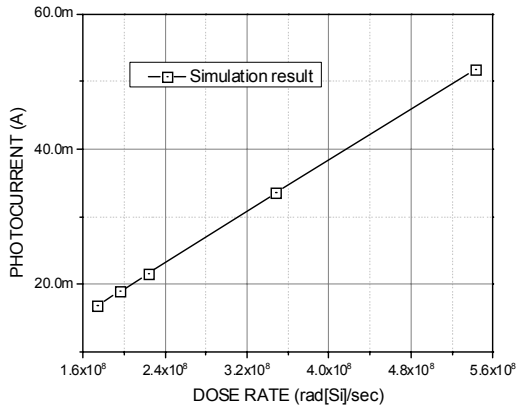


그림 7 PIN 다이오드의 펄스감마선 시뮬레이션 결과
 Fig. 7 The simulation result of the PIN diode to the dose rate

2.4 실측값과 3D 모델 시뮬레이션 결과의 비교분석

이상의 두 과정, 즉 동일한 펄스방사선에 대한 실측시험과 M&S 결과를 동시에 나타낸 그림 8로부터 조사한 펄스방사선 범위에서의 두 출력 광전류의 크기는 오차범위에서 유사한 특성을 가지고 있으며, 이때 최대 오차는 27.85%임을 알 수 있다. 높은 선량을 영역의 전산모사에서 이같이 실험치보다 높게 계산된 이유는 전산모델 자체가 실제 일어날 모든 물리적 현상들을 다 고려하지 못한데 기인한다. 즉, 감마선이 알루미늄 전극과 상호작용에서 에너지 손실이 발생하고, 이후 실리콘 격자들과 충돌로 점점 에너지를 잃게 되는 것, 그리고 감마선에 의하여 생성된 전하들이 두 전극으로 흡수되기 이전에 재결합(recombination) 되어 감소되는 점 등이 반영되어야 하며, 시뮬레이션에서 사용된 펄스형태도 실제 펄스모양과는 다소 오차가 있기 때문이다. 향후 이러한 요소들이 충분히 고려될 경우 실험과 전산모사의 차이는 크게 감소될 수 있을 것이다.

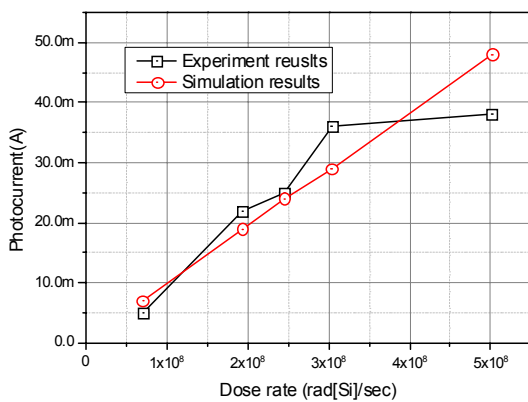


그림 8 M&S와 실측시험 결과 비교
 Fig. 8 The comparison of the M&S and the irradiation test results

3. 결 론

본 연구는 반도체 소자에 대한 펄스방사선 피해현상을 체계적으로 분석 및 예측할 수 있는 피해평가 모델을 개발하기 위한 국내 첫 시도로서 PIN 다이오드를 대상으로 실측시험과 모델링·시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 비교분석한 것이다. 먼저 반도체 공정을 통해 설계 제작한 PIN 다이오드를 핵방출 방사선과 유사한 펄스형 감마 방사선에 세기별로 조사하면서 출력되는 순간 전류값을 측정하였다. 다음으로 동일한 공정설계 변수의 PIN 다이오드 3D 모델에 실측에서 사용된 펄스와 유사한 펄스모델을 단계적으로 입력한 후 소자 내부에서 생성된 순간전하의 거동을 분석하고 출력 전류값을 시뮬레이션 하였다. 이상의 두 과정에서 얻은 실측시험의 PIN 다이오드 출력 전류값들과 3D 모델 출력전류 시뮬레이션 결과는 선형적으로 유사한 특성을 보였으며, 실험에 이용된 조사 선량을 구간 내에서 전류값의 최대 오차는 27.85%로 확인되었다. 하지만, 대부분의 조사 선량을 구간 동안 10%이내의 전류값 오차를 가졌으며 특히, 오차 10% 이상의 구간은 높은 조사 선량으로 인하여 실물의 PIN 다이오드가 전기적인 물성 변화를 일으킨 상황에서 기인한 것으로 예상된다. 따라서 향후 다양한 물리적 요소를 시뮬레이션에 반영하여 오차를 최소화함과 동시에 보다 복잡한 구조의 반도체 소자를 대상으로 펄스방사선 피해평가 모델 구축연구를 확대 발전시킬 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 민간기술협력진흥센터의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] George C. Messenger, "Transient Radiation Effects on Electronics", IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 33, no. 5, pp. 1125, 1986.
- [2] Mohamed N. Darwish, Martin C. Dolly, Charles A. Goodwin, "Radiation Effects on Power Integrated Circuits", IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 35, no. 6, pp. 1547-1551, 1988.
- [3] Chugg, A.M., "Ionizing Radiation effects: a vital issue for semiconductor electronics", Engineering Science and Education Journal, vol. 3, no. 3, pp. 123-130, 1994.
- [4] Sanghoon Jeung, Namho Lee, Minsu Lee, Seungik Cho, "A Study of CMOS Device Latch-up Model with Transient Radiation", Trans. KIEE., vol. 61, No. 3, pp. 422-426, 2012.
- [5] <http://www.nasa.gov/>
- [6] <http://www.sandia.gov/>
- [7] D. C. Sullivan, "Transient Radiation-Induced Response of MOS Field Effect Transistors", , 2007.

- [8] Tor A., Yanqing Deng, Michel S. "Modeling of High-Dose-Rate Transient Ionizing Radiation Effects in Bipolar Devices", Contract AF29(601)-6489
- [9] A. H. Johnson, G. M. Swift, L. D. Edmonds, "Latchup in Integrated Circuits from Energetic Protons", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 44, no. 6, pp. 2367-2467, 1997.
- [10] David E. Fulkerson, David K. Nelson, Roy M. Carlson, Eric E. Vogt, "Modeling Ion-Induced Pulses in Radiation-Hard SOI Integrated Circuits", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 3, no. 3, pp. 1406-1505, 2007.
- [11] Namho Lee, Seungmin Lee, "Modeling and Simulation for Transient Pulse Gamma-ray Effects on Semiconductor devices", Trans. KIEE., vol 59, No. 9, pp. 1611-1614, 2010.
- [12] H. Spieler, "Semiconductor Detector Systems", Oxford University Press. 2008.

저 자 소 개



이 남 호 (李南昊)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업, 1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업, 2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업, 현재 : 한국원자력연구원 융합 기술개발부 책임연구원
 주관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템



이 승 민 (李承珉)

2000년 충남대학교 전기공학과 졸업 학사), 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사), 2007년 동 대학원 충남대학교 전기공학과 졸업(박사), 2007~2009년 한국원자력연구원 P.D., 2009년~ 현재 충남대학교 사범대학 전기전자통신공학교육과 초빙교수
 주관심분야 : 방사선 센서, 방사선 계측 제어, 방사선 영상처리