

## 광대역 펄스감마선 탐지센서 최적화 설계 및 제작

정상훈<sup>1</sup> · 이남호<sup>2\*</sup>

### Optimized Design and Manufacture of Wideband Pulsed Gamma-ray Sensors

Sang-hun Jeong<sup>1</sup> · Nam-ho Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

<sup>2\*</sup>Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 광대역 펄스감마선 탐지센서 최적화 설계를 수행하고 설계결과를 기반으로 탐지센서를 제작하여 전기적 특성을 분석하였다. 탐지센서의 최적화 설계를 위해 펄스감마선의 시간에 따른 에너지 프로파일로부터 입력 변수를 도출하고 탐지감도 제어회로를 통하여 출력전류 범위를 결정하였다. 도출된 변수를 바탕으로 N-type Epi Wafer 및 TCAD(Technology Computer Aided Design)로 설계하고 제작하였다. 제작된 탐지센서의 전기적 특성 분석 결과 -3.3V 전압에서 12pA의 누설전류와 -5V의 전압에서 완전 공핍화 되는 특성을 가짐을 확인하였다. 제작된 센서의 포항가속기연구소 TEST LINAC 시험결과 감마선 설정 선율의 펄스방사선에 대해 고감도의 광전류를 생성시킴을 확인하였다.

#### ABSTRACT

In this paper, we are proposing an optimal design of wideband pulsed type gamma-ray sensors. These sensors were manufactured based on the design results and after word electrical properties were analyzed. The sensor input parameters were derived on the basis of pulsed gamma-ray spectrum and time-dependent energy rate, and the output current which were derived on the basis of the sensor sensitivity control circuit. Pulsed gamma-ray sensors were designed using the TCAD simulators. The design results show that the optimal Epi layer thickness is 45um with the applied voltage 3.3V and the diameter is 2.0mm. The doping concentrations are as follows : N-type is an Arsenic as  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ , P-type is a Boron as  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  and Epi layer is Phosphorus as  $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ . The fabricated sensor was a leakage current, 12pA at voltage - 3.3V and fully depleted mode at voltage - 5V. A test result of pulsed radiation shows that the sensor gives out the optimal photocurrent.

**키워드** : 펄스감마선, 탐지센서, 누설전류, 방사선율

**Key word** : Pulse radiation, Sensor, Leakage Current, Dose-rate

Received 12 August 2016, Revised 16 August 2016, Accepted 29 August 2016

\* Corresponding Author Nam-ho Lee(E-mail:nhlee@kaeri.re.kr, Tel:+82-42-868-2240)

Department of Nuclear Convergence Techonology Development, Koarea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2017.21.1.223>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

펄스방사선으로 인해 발생하는 전자소자의 피해현상은 Upset, Latch-up, Burn-Out 등이 있으며 원인은 전자소자 내부에서 발생하는 광전류에 기인한다[1-3].

펄스방사선으로 인한 전자소자의 피해현상을 최소화하는 방안으로 펄스방사선을 고속 탐지하여 신속히 전자소자의 전원을 차단하는 기법이 활용될 수 있다.

펄스방사선을 탐지하기 위해서는 고선율의 펄스방사선을 PIN Diode로 검출하고 검출신호를 발생시키는 펄스방사선 검출기가 이용된다[4,5].

전자소자에 따라서 펄스방사선에 의해 Upset, Latch-up이 발생하는 문턱 값이 다르므로 대상소자에 따라 동작되는 선율을 달리하여야 하며 고장이 발생하기 시작하는 시점보다 낮은 선율에서 탐지신호를 발생해야 하므로 탐지범위를 광대역으로 약  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$  rad(Si)/s로 설계하여야 한다.

PIN Diode형 탐지센서에서는 체적과 입사된 에너지에 비례하여 광전류가 생성된다. 탐지센서의 체적이 작을 경우 광전류 발생량이 부족하여 낮은 선율에서의 방사선 감지가 어렵고, 체적이 클 경우 광전류 발생량이 넘쳐 높은 선율에서 포화되는 문제가 발생한다. 따라서 광대역의 펄스방사선을 탐지하기 위해서는 최적화 설계가 필요하다[6].

본 논문에서는 펄스감마선 스펙트럼과 시간에 따른 에너지 프로파일을 기반으로 탐지센서 입력변수를 도출하고, 탐지감도 제어회로로 탐지센서 출력전류를 도출하여 최적화된 광대역 펄스감마선 탐지센서를 설계 제작하고 펄스방사선에 의한 광전류 발생을 분석하였다.

## II. 탐지센서 입력변수 도출

펄스방사선은 수 십 ns 이내의 짧은 시간 동안에 매우 높은 에너지를 갖는다. 그림 1에 펄스감마선의 시간에 따른 에너지 비율을 보여주며 1 us 이내의 높은 에너지가 전자소자에 직접적으로 영향을 준다[7]. 그림 1의 실선은 낮은고도에서 발생하는 펄스감마선 에너지 비율이며, 점선은 높은고도에서 발생하는 펄스감마선 에너지 비율이다. 그림 2는 그림 1를 기반으로  $1 \times 10^5 \sim$

$1 \times 10^7$  rad(Si)/s의 선량에 해당하는 Energy profile을 도출한 것이며 탐지센서 설계에 필요한 입력변수이다.

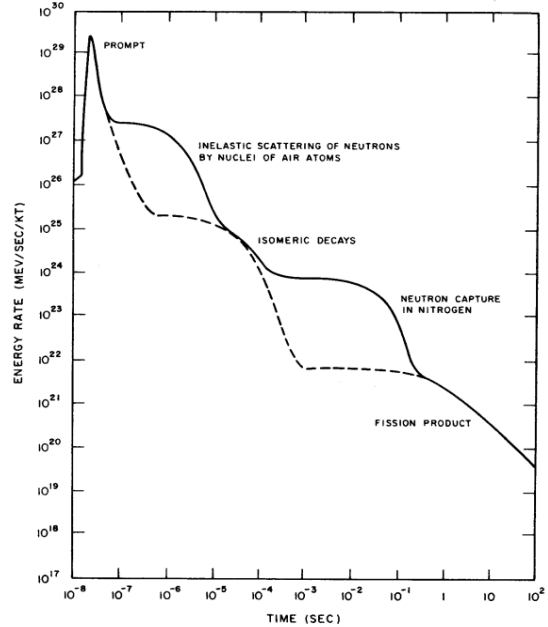


Fig. 1 Calculated Time Dependence of the Gamma-ray Energy Rate

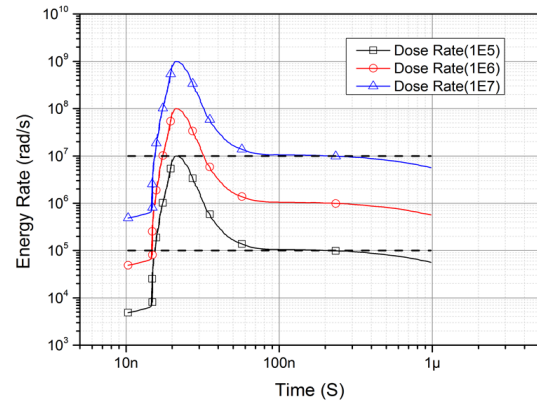


Fig. 2 Energy Profile for the Detection Range

탐지센서가 기술한 선량범위에서 작동하기 위해서는 출력 값이 선형적인 특성을 가져야 하며 동시에 탐지센서 제어회로 또한 선형적인 구간에서 동작하여야 한다. 그림 3은 탐지센서 제어회로를 보여주며 그림 4

는 탐지센서 제어회로 동작전류 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4에서 보는바와 같이 Rth가 5 ~ 5kΩ인 구간에서 선형적이므로, 탐지센서 출력전류가 위 범위에 들어오도록 설계하여야 한다. 시뮬레이션을 통해 탐지센서의 출력전류 범위를 195uA ~ 132mA로 결정하였다.

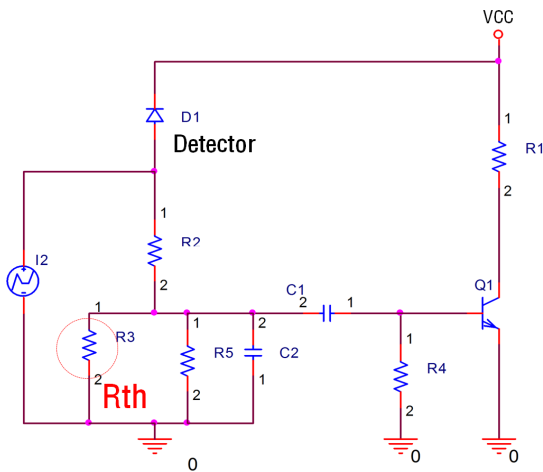


Fig. 3 Sensor Control Circuit

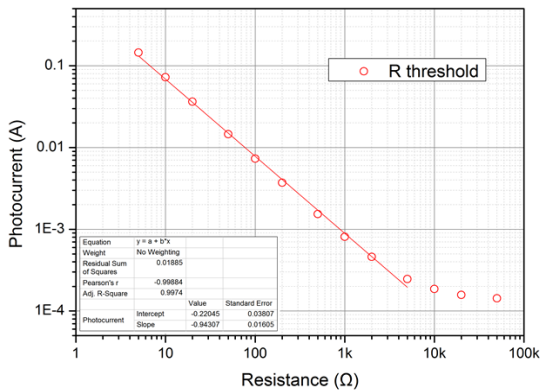


Fig. 4 Sensor Control Circuit Operating Current by Rth

### III. 펄스감마선 탐지센서 최적화 설계

탐지센서 입력변수를 기반으로 TCAD (Technology Computer Aided Design)를 이용하여 PIN 구조의 탐지

센서를 모사하였다. N-type Epi 웨이퍼 기반으로 시뮬레이션을 진행하였으며 N-type은 Arsenic으로 도핑농도는  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ , Epi 층은 Phosphorus로  $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 이다. 탐지센서의 최적조건을 도출하기 위해 펄스감마선을 에너지로 환산하여 그림 5와 같이 시뮬레이션을 진행하였다.

탐지센서 최적조건 시뮬레이션 결과 인가전압 3.3V에서 Epi 층 두께에 따른 탐지센서의 최대 광전류는 45 um에서 가장 높게 나왔으며 그림 6에서 보여준다. 도핑농도에 따른 광전류 특성 시뮬레이션 결과 Boron으로  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 일 때 광전류가 가장 높게 발생되었으며 그림 7에서 보여준다.

위 두 조건을 적용하고 탐지센서 직경별로 모사한 결과를 그림 8에서 보여주며 출력전류 범위를 만족하면서 응답특성이 가장 좋은 크기는 2.0mm가 도출 되었다.

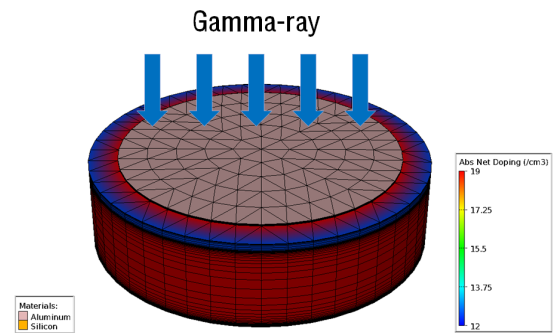


Fig. 5 Pulsed Gamma-ray Simulation of Sensor

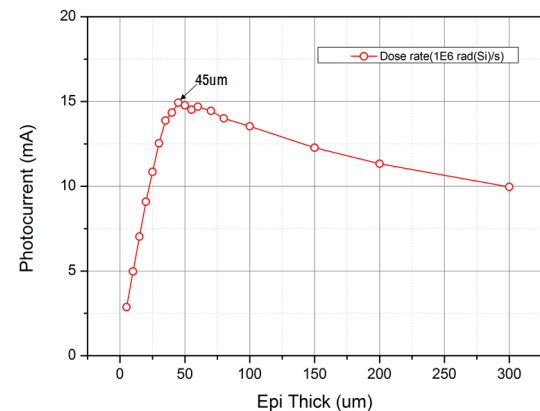


Fig. 6 Maximum Current of Sensor by Epi Thickness

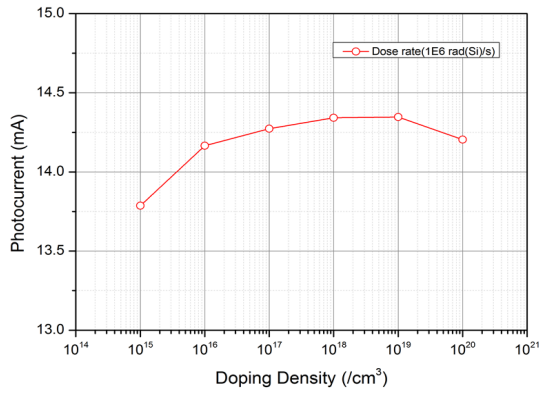


Fig. 7 Maximum Current of Sensor by Doping Density

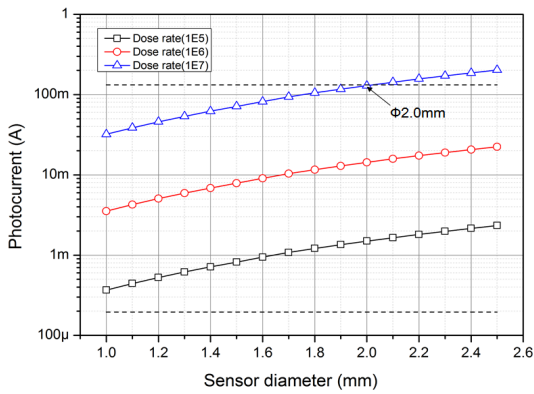


Fig. 8 Maximum Current of Sensor by Diameter

앞서 시뮬레이션에서 도출한 Epi 두께는 45um지만 45um Epi Wafer를 구하는데 한계가 있어 40um로 진행하였다. 그림 9는 제작된 펄스방사선 탐지센서를 보여준다.

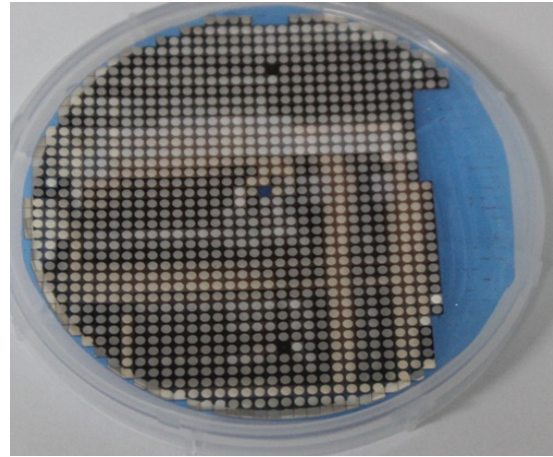


Fig. 9 Wideband Pulsed Gamma-ray Sensors

#### 4.1. 탐지센서 전기적 특성

제작된 펄스방사선 탐지센서의 전기적 특성 분석을 위해서 I-V 특성 및 C-V 특성을 측정하였다. 그림 10은 I-V 특성을 보여주며 인가전압 3.3V, 25℃에서 누설전류가 12pA가 측정되었고 85℃에서 3nA가 측정되었다. 그림 11은 C-V 특성을 보여주며 약 5V에서 Fully Depleted 되는 것을 확인할 수 있다.

### IV. 펄스방사선 탐지센서 제작 및 검증

펄스방사선 탐지센서 설계변수 도출결과를 기반으로 나노중합기술원에서 탐지센서를 제작하였다. 탐지센서 제작에 사용된 웨이퍼 사양은 표 1에서 보여준다.

Table. 1 Epi Wafer Specifications

Substrate			
Size	Type	Res. Ωcm	Surf.
4"φ×380um	n-Si:As[111]	0.004-0.008	P/EOx
Epi			
Thick um	Type	Res. Ωcm	
40	n-Si:P	>5500	

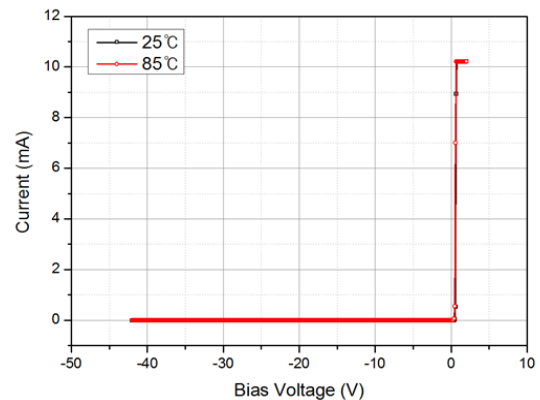


Fig. 10 Sensor I-V characteristics

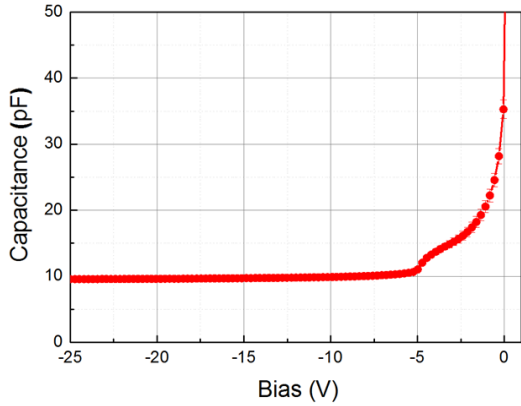


Fig. 11 Sensor C-V characteristics

#### 4.2. 탐지센서 펄스방사선 특성

제작된 펄스방사선 탐지센서의 펄스방사선 응답특성을 알아보기 위해 포항가속기연구소의 TEST LINAC에서 펄스방사선 조사시험을 수행하였다. 그림 12에 펄스방사선 시험 사진을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 전자빔가속기에서 발생된 전자빔을 텅스텐 변환기를 이용하여 감마선으로 변환하여 탐지센서에 조사하였다. 탐지센서에는 3.3V를 인가하였고 Load 저항은 50Ω을 부착하였다. 방사선은 반도체형 실시간 Dosimetry를 사용하여 측정하였다[8].

그림 13은  $1.81 \times 10^6 \text{ rad(Si)/s}$ 의 선율에서 펄스방사선 시험한 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 탐지센서 최대 전압이 0.421V이고 Load 저항은 50Ω이므로 전류가 8.42mA 발생되는 것을 확인하였다.

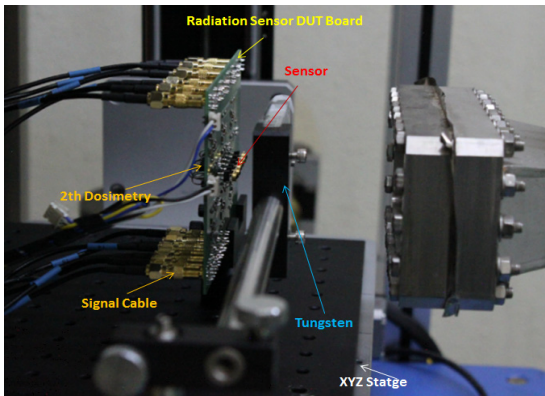


Fig. 12 Sensor Pulsed Radiation Test

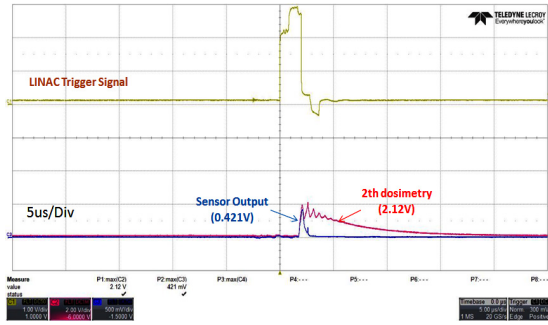


Fig. 13 Sensor Test Result( $1.81 \times 10^6 \text{ rad(Si)/s}$ )

## V. 결론

본 연구에서는 광대역 펄스감마선 탐지센서 최적화 설계를 수행하고, 설계결과를 기반으로 탐지센서를 제작하여 전기적 특성을 분석하였다.

펄스감마선 탐지센서는  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{ rad(Si)/s}$ 의 방사선율에서 동작할 수 있도록 설계하였다. 설계과정은 에너지에 따른 펄스감마선 스펙트럼과 시간에 따른 에너지 비율을 기반으로 탐지센서 입력변수를 도출하고, 탐지감도 제어회로를 기반으로 탐지센서 출력전류를 도출하여 두 가지 조건을 만족할 수 있도록 N-type Epi Wafer를 이용하여 TCAD 기반으로 수행하였다.

그결과 인가전압 3.3V에서 최적 Epi층 두께는 45um, 도핑농도를 N-type은 Arsenic  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ , P-type은 Boron  $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ , 그리고 Epi 층은 Phosphorus로  $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 가 최적조건으로 수립되었다. 또한 탐지센서의 크기는 원형으로 지름이 2.0mm가 탐사 선율에 적합하였다.

설계결과를 기반으로 제작된 탐지센서의 전기적 특성 측정결과 3.3V에서 12pA의 작은 누설전류를 확인하였으며 C-V 특성 분석결과 약 5V에서 Fully Depleted됨이 확인되었다. 제작된 탐지센서의 펄스방사선 반응 특성분석 시험에서 충분한 전류 발생이 나타났다. 향후 추가 실험을 통해 선율별 광전류 발생 특성을 분석할 예정이다.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by the Core Technology R&D program through the Defense Industry Technology Center and the Institute of Civil Military Technology Cooperation.

### REFERENCES

- [1] R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*, 1st ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1955.
- [2] G. C. Messenger, and M. S. Ash, *The effects of radiation on electronic systems*, 2<sup>nd</sup> ed. New York, NY: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1992.
- [3] L. Cohn, M. Espig, A. Wolicki, M. Simons, C. Rogers and A. Costantine, "Transient Radiation Effects on Electronics (TREE) Handbook," Defence Nuclear Agency, Alexandria: VA, Technical Report DNA-H-95-61, 1995.
- [4] L. L. Longden, Nuclear Event Detector, US patent 5,687,622, to IRT Corporation, San Diego, 1987.
- [5] N. H. Lee, Y. G. Hwang, S. H. Jeong, J. Y. Kim, "An Experimental Analysis for a High Pulse Radiation Induced Latchup Conformation," *Journal of The Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 12, pp. 3079-3084, Dec. 2014.
- [6] A. H. Siedle, L. Adams, *Handbook of Radiation Effects*, 2nd ed. New York, NY: Oxford University Press Inc., 2002.
- [7] S. Glasstone, P. J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed. United States Department Of Defense, 1977.
- [8] S. H. Jeong, N. H. Lee, S. C. Oh, Y. G. Hwang, "Calibration of Pulse Radiation dose using a PIN diode", in *Proceedings of the 28th International Technical Conference on Circuits/ System, Computers and Communications*, Korea, pp. 1119-1121, 2013.



**정상훈(Sang-Hun Jeong)**

2007년 전북대학교 반도체과학기술학과 학사 졸업,  
2009년 전북대학교 전자정보공학부 석사 졸업,  
2014년 전북대학교 전자정보공학부 박사 졸업,  
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 박사후연구원  
※관심분야 : 방사선 센서, 펄스신호 고속처리, 전원차단회로



**이남호(Nam-Ho Lee)**

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업,  
1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업,  
2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업,  
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 책임연구원  
※관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템