

KAERI/CM-1319/2009

방사선기술개발사업
(Development of Radiation Technology)

반도체 방사선 계측기 설계 전산모사 및
특성측정 기술개발
(Simulation and Performance Test Technology
Development for Semiconductor Radiation
Detection Instrument Fabrication)

한양대학교 산학협력단

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2010년도 "반도체 방사선 계측기 설계 전산모사 및 특성측정 기술 개발"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2010. 6.

연구기관명 : 한양대학교 산학협력단

과제책임자 : 김종경 (한양대학교)

참 여 자 : 이우교 (한양대학교)

김순영 (한양대학교)

신창호 (한양대학교)

김경오 (한양대학교)

박정민 (한양대학교)

장도윤 (한양대학교)

강정수 (한양대학교)

요 약 문

I. 제목

반도체 방사선 계측기 설계 전산모사 및 특성측정 기술개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

반도체 검출기는 반도체 물질의 성질을 이용하여 방사선의 에너지 및 스펙트럼을 측정하는 장비를 말하며, 타 검출기들에 비해 이온쌍(전자와 양공)을 생성시키는데 필요한 에너지가 훨씬 적다는 특징을 가지고 있다. 또한, 입사방사선에 대한 출력신호가 매우 크고 펄스파고의 변동이 작아 미래형 차세대 검출기로 각광받고 있다. 하지만, 대부분의 해외 기관들에서는 반도체 검출기에 대한 연구내용을 공개하지 않고 있으며 연구가 시작된 지 얼마 되지 않아 해당분야에 대한 원천기술을 확보하는 것이 매우 중요한 상황이다.

본 연구에서는 한국원자력연구원에서 제작한 반도체 계측기, 특히 센서 내부에서의 방사선 거동을 정확하게 해석하고 금속박막 표면의 특성평가 및 이온 주입에 따른 wafer 물성변화를 상세히 분석한다. 이를 통해, 방사선 반응 모사 기술 및 시제품의 물리적 특성 평가방법을 개발하고 국내 반도체 방사선 계측기 설계시에 필요한 기반기술을 확보하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 “반도체 방사선 계측기 설계 전산모사 및 특성측정 기술개발” 과제의 1단계 최종연구로서, 2개의 세부 연구분야로 나누어 수행되었으며 다음과 같이 연구개발의 내용, 결과, 활용계획을 각 분야별로 나누어 기술하였다.

1. 방사선 반응모사 기술 개발

a. 1차년도

- 반도체 계측기 분석을 위해 사용되는 대표적인 전산모사 코드들과 전기장 분석이 가능한 시뮬레이터들의 특징 분석
- MCNPX 코드를 이용하여 CZT 센서 투과깊이에 따른 흡수선량 분포 및 전자생

성을 분석

- 한국원자력연구원에서 개발한 평판형 반도체 센서($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)의 Benchmarking 시뮬레이션을 수행
- 방사선에 의해 생성된 전하들의 포집효율을 계산하기 위하여 Hecht 모델과 Drift Diffusion 모델의 특징 분석

b. 2차년도

- 저에너지 감마선과 알파입자를 이용하여 반도체 계측기 내부 전압변화에 따른 측정 스펙트럼 변화를 분석
- 반도체 센서 내에 부여된 전기장 세기와 Bias Potential을 분석하여 방사선 거동 해석에 적합한 모델 선정
- 선정된 모델을 이용하여 CZT 센서 내부에 생성된 이온쌍의 평균이동수명시간을 계산
- 또한, 모델을 이용하여 전자와 홀의 이동경로 및 계측기 양단(Cathode, Anode)에서의 전하포집 효율을 도출
- 이온쌍의 전하포집효율을 고려한 몬테칼로 전산모사 결과와 실험결과를 비교 및 분석

c. 3차년도

- 몬테칼로 코드와 호환되는 Geometry 입력모듈 개발
- 사용자가 정의 가능한 선원형 입력모듈 개발
- 사용자 편의성을 강화한 계산결과 시각화모듈 개발
- 계산결과 및 그래픽 처리속도 향상을 위한 코드개선

2. 시제품의 물리적 특성 평가방법 개발

a. 1차년도

- 이온 주입된 반도체 웨이퍼 및 공기 중에 노출된 반도체 시편 표면에 자연적으로 형성되는 SiO_2 절연층에 대한 Auger 검사를 통해 이온 농도 분석
- 열처리 및 세척 공정에 따른 반도체 시편의 표면 변화 분석을 위한 AFM 촬영 및 Roughness 측정

b. 2차년도

- CZT Passivation 공정 후 반도체 검출기 표면에 대한 물리적 특성 측정

- C(Z)T 단결정 결정구조 및 비저항 특성 평가
- C(Z)T 단결정 Band Structure 측정/평가
- 온도 변화에 따른 중성자 전환막 특성평가

c. 3차년도

- CZT 단결정 결정 구조, 비저항, Band Structure에 대한 물리적 특성 측정/평가
- 방사선 조사 후 SiC 반도체 검출기 내부 변화 측정/평가
- 고온 환경 노출에 따른 반도체 검출기 특성 변화 측정/평가

IV. 연구개발결과

1. 방사선 반응모사 기술 개발

- 몬테칼로 전산모사 코드를 이용하여 방사선 종류와 에너지에 따른 반응 특성을 분석하였으며 특히 투과길이에 따른 흡수선량 분포와 전자의 생성 비율 등을 분석함으로써 반도체 센서 내 방사선 거동해석을 위한 기초자료를 확보
- 한국원자력연구원에서 개발한 평판형 반도체 센서($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)를 모델링하여 시뮬레이션을 수행함으로써 향후 계측기 관련 해석자료를 구축
- 다양한 감마선원들 Rh^{103m} (39.75 keV), Am^{241} (59.5 keV), Cd^{109} (88.034 keV), Sc^{47} (159.381 keV), Cr^{51} (320 keV), Cs^{137} (662 keV)을 이용함으로써 방사선 종류 및 에너지 별 반응 특성을 충분히 분석
- 본 연구를 통해 도출된 다양한 반응스펙트럼들을 실험자료들과 비교함으로써 계산의 정확성을 확보
- 59.5 keV 감마선과 5.5 MeV 알파입자를 이용하여 반도체 계측기 내부 전압변화에 따른 측정 스펙트럼 변화를 분석하였으며 특히 Hecht 모델을 이용하여 CZT 센서 내부에 생성된 이온쌍의 평균이동수명시간을 계산함으로써 방사선 거동해석 체계의 기초자료를 확보
- 반도체 센서 내에 부여된 전기장 분포와 Bias Potential을 분석하여 방사선 거동 해석에 적합한 모델을 선정하고 전자와 홀의 이동경로 및 계측기 양단(Cathode, Anode)에서의 전하포집 효율을 도출해냄으로써 향후 계측기 관련 해석자료 구축 및 벤치마킹 등에 유리
- 본 연구를 통해 도출된 이온쌍의 전하포집효율을 고려하여 수행된 몬테칼로 전산모사 결과를 반도체 계측기 측정결과와 비교/분석함으로써 계산의 정확성 확보는 물론 구축된 해석체계의 성능, 신뢰성 또한 확보

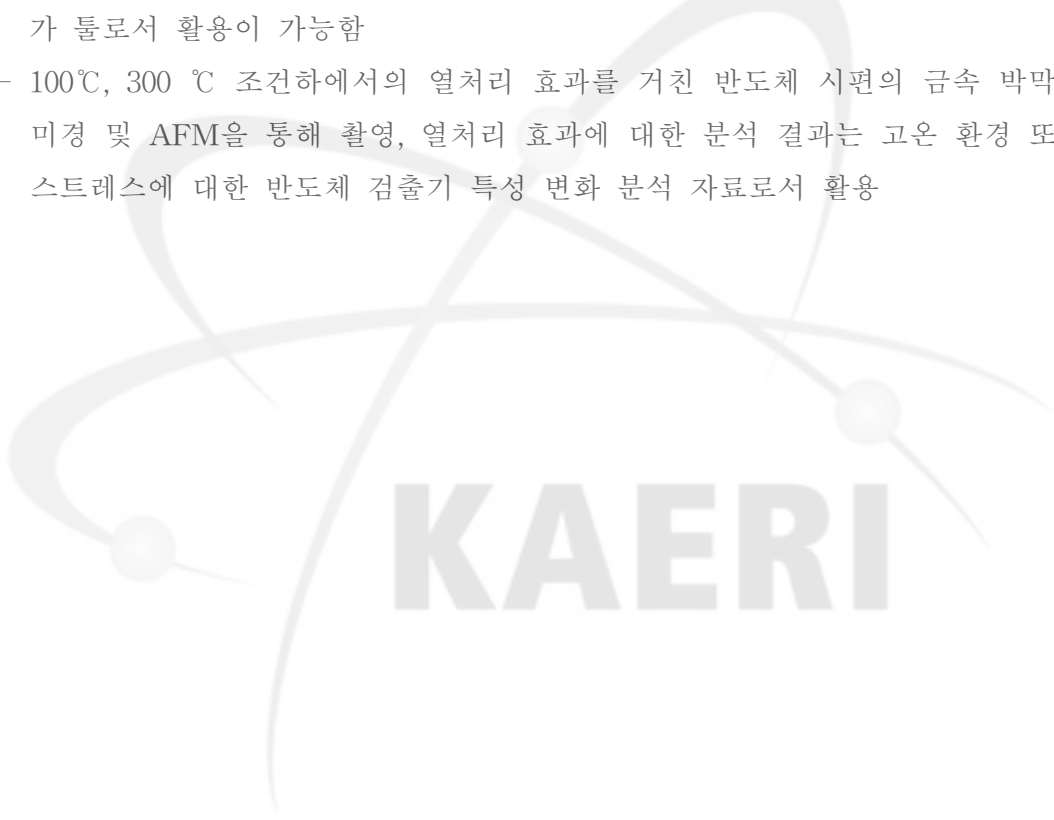
- GUI 기반의 반도체 센서 설계코드를 국내최초로 개발하였으며 이를 통해 제작된 반도체계측기의 성능평가를 다양하게 수행할 수 있고 쉽게 분석을 수행

2. 시제품의 물리적 특성 평가방법 개발

- 반도체 웨이퍼 표면에 주입된 Phosphorus와 Boron에 대한 농도 및 주입 깊이를 Auger 검사를 통해 분석, 이온 도핑 농도 및 깊이에 대한 분석은 반도체 내부에 형성되는 다양한 도핑층에 대한 구조 해석을 가능하게 하며 이를 통해 PIN 구조와 같은 반도체 검출기 제작 및 방사선 반응 영역 분석이 가능
- 절연 특성을 지닌 SiC Wafer에 10^{18} 조건하에서 주입된 Boron이 열처리에 의해 확산되어 도핑층의 두께가 증가하는 효과를 분석하기 위해 Auger 검사 사용, 두꺼운 도핑층은 방사선 반응성을 향상시키므로 이온 주입과 열확산 공정을 병행하였을 경우 물리적으로 안정한 SiC 반도체 내부에 보다 두꺼운 도핑층 형성 여부 판단 기준을 제시
- 반도체 시편이 공기 중 노출에 의해서 생성되는 자연적 SiO_2 절연층 두께를 Auger 검사를 통해 측정, 절연층 두께 정보는 박막 구조 분석에 유용
- 반도체 표면에 다양한 조건의 세척 공정을 적용하였을 때 표면 변화를 측정하기 위하여 AFM 촬영 및 Roughness 분석, 세척 공정은 금속 박막 형성에 영향을 미치므로 보다 안정적인 박막 형성을 위한 제작 조건을 제시함
- 측정된 Current-voltage 특성 곡선 및 감마 반응 스펙트럼 분석을 통해 CZT 단결정 표면에 Passivation 공정 적용은 Leakage Current 감소 및 감마선 에너지 분해능을 향상 시켜주는 결과를 보여줌. 이러한 결과를 통해 반도체 검출기 금속 박막 공정 과정에 Passivation 공정을 적용할 경우 보다 안정적이고 분해능이 향상된 검출기 제작 가능성을 검증
- XRD 검사를 통해 CZT 단결정이 (111) 방향의 일정한 격자구조를 가지고 있는 것으로 분석되었고 이를 통해 성장된 CZT 단결정의 품질이 우수함을 확인
- Photoluminescence 측정을 통해 CZT 단결정의 밴드구조를 측정함. 측정 결과 800 nm 근처의 Peak은 밴드 구조에서 Forbidden Band 영역에 Defect가 발생. Defect 검사 결과를 통해 단결정의 품질을 확인할 수 있고 검출기 제작시 신호 측정 Error 분석이 가능함
- 샌드위치 방식으로 제작된 6LiF 전환박막에 대해 150℃ 열처리 결과 중성자 반응성은 동일하였고, 알파 반응에서는 노이즈 감소 및 분해능 향상이 이루어짐. 고온 환경에 노출되어도 전환박막의 박리와 반응성에는 문제가 없음을 검증

V. 연구개발결과의 활용계획

- 센서 내 전하포집효율을 분석하기 위한 Hecht 모델과 Drift Diffusion 모델은 향후 반도체 센서 해석체계 확립을 위한 보조 계산 자료로 활용가능
- 본 연구를 통해 구축된 방사선 종류와 에너지에 따른 반응자료는 반도체 센서 내 방사선 거동해석을 위한 기초자료로 활용
- 한국원자력연구원에서 개발한 평판형 반도체 센서($5\times 5\times 5\text{ mm}^3$)를 모델링하여 시뮬레이션을 수행함으로써 향후 계측기 관련 기반기술로 활용
- 국내최초로 개발된 GUI 기반의 반도체 센서 설계코드는 반도체 계측기의 사전평가 툴로서 활용이 가능함
- 100°C , 300°C 조건하에서의 열처리 효과를 거친 반도체 시편의 금속 박막을 현미경 및 AFM을 통해 촬영, 열처리 효과에 대한 분석 결과는 고온 환경 또는 열스트레스에 대한 반도체 검출기 특성 변화 분석 자료로서 활용

The logo of KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered in the background. It features a stylized circular design with two spheres and connecting lines, resembling an atomic model or a particle detector. The word "KAERI" is written in large, bold, capital letters across the center.

KAERI

SUMMARY

I. Title

Simulation and Performance Test Technology Development for Semiconductor Radiation Detection Instrument Fabrication

II. Objectives and Necessity of Research

Semiconductor detector is a equipment measuring the energy and spectrum of incident radiation and consumes the energy lower than other radiation detectors in order to produce the ion-pair (electron and hole). Also, this detector is in the spotlight as the next generation detector because the output signal produced by incident radiation is very high and pulse variation is lower than other detectors. In this time, it is very important to obtain the core technology related with this field because most institutes abroad do not release the research contents about this detector.

This study accurately analyzes the radiation behavior in the semiconductor sensor, manufactured by Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), characteristic evaluation of a thin metal film, and wafer property transformation. As a result, the method of radiation interaction simulation and physical characteristic evaluation to design a semiconductor detector can be obtained in the Korea.

III. Scopes and Contents of the Project

This study is the first in a sequence of "Simulation and Performance Test Technology Development for Semiconductor Radiation Detection Instrument Fabrication" project which is composed of two particular parts. Hereafter, contents, results, and the application plan of this study are described as following two subjects.

1. Development of the Radiation Transport Analysis System Based on the Monte

Carlo Code

a. 1st Year

- Characteristic Analysis on the Representative Radiation Simulation Code and Simulator for the Electric Field
- Analysis on the Absorbed Dose and Electron Generation by Using MCNPX Code
- Benchmark Simulation of Planar Semiconductor Sensor Developed in KAERI
- Characteristic Analysis on the Hecht and Drift Diffusion Models for Investigating the Charge Collection Efficiency

b. 2nd Year

- Analysis on the Change of Measured Energy Spectrum As a Function of Bias Voltage Applied in Semiconductor Detector
- Selection of the Suitable Model to Analyze the Radiation Transport through the Simulation of Electric Field Magnitude and Bias Potential in CZT Sensor
- Calculation of the Ion-pair Mobility-lifetime Product by Using Selected Model
- Determination of the Charge Collection Efficiency at Each Electrode
- Comparison of Monte Carlo Simulation Considering the Charge Collection Efficiency and Experimental Result

c. 3rd Year

- Development of Geometry Input Module Compatible with Monte Carlo Code
- Development of Radiation Source Input Module Definable from the User
- Development of Visualization Module
- Code Improvement for Reducing the Time of Calculation and Processing Velocity

2. Development of evaluation method for physical properties of prototype

a. 1st Year

- Analysis on Depth Profile of Ion-implanted Semiconductor Wafer Surface and Naturally Generated SiO₂ Insulating Layer Using Auger Electron Spectroscopy
- Measurement of AFM Images and Roughness to Analyze Surface of

Semiconductor Wafer with respect to Annealing and Cleaning Process

b. 2nd Year

- Measurement of Physical Properties for Semiconductor Detector Surface after CZT Passivation Process
- Evaluation of Crystal Structure and Specific Resistance of C(Z)T
- Measurement/Analysis on Band Structure of C(Z)T Crystal
- Evaluation of Neutron Converter Layer with respect to Change in Temperature

c. 3rd Year

- Measurement/Evaluation of physical characteristics for lattice parameter, specific resistance, and band structure of CZT crystal
- Measurement/Evaluation of lattice transition of SiC semiconductor detector after radiation irradiation
- Measurement/Evaluation of performance of semiconductor detector with respect to exposure in high temperature environment

IV. Results of Research

1. Development of the Radiation Transport Analysis System Based on the Monte

- Analysis on the Radiation Interaction, as a Function of Radiation Type and Energy, by Using Monte Carlo Code
- Construction of the Basic Data for the Radiation Transport Analysis
- Construction of the Analytic Data through the Simulation of the Planar Semiconductor Sensor Developed in KAERI
- Analysis on the Radiation Interaction as a Function of Radiation Type and Energy by Using Various Gamma-ray Source (i.e., Rh^{103m}(39.75 keV), Am²⁴¹(59.5 keV), Cd¹⁰⁹(88.034 keV), Sc⁴⁷(159.381 keV), Cr⁵¹(320 keV), Cs¹³⁷(662 keV))
- Validation of the Calculation Accuracy by the Comparison of the Simulation and Experimental Results

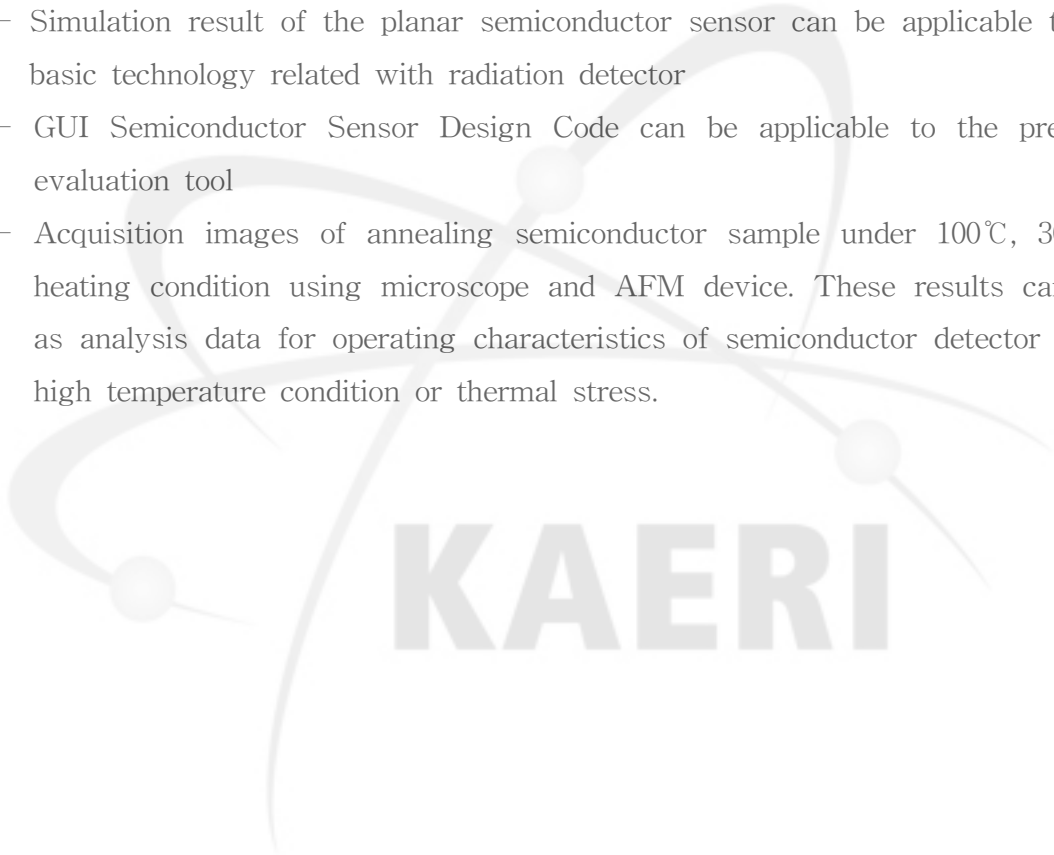
- Analysis on the Change of Measured Energy Spectrum by Using 59.5 keV Gamma-ray and 5.5 MeV Alpha Particle
- Development of Semiconductor Sensor Design Code Based on the Graphic User Interface (GUI)

2. Development of evaluation method of physical characteristics for prototype

- Analysis on ion density and depth profile of semiconductor wafer surface implanted phosphorus and boron using Auger Electron Spectroscopy. Structure of various doping layer in semiconductor can be analyzed based on data for ion doping density and depth profile. Also, radiation response region of semiconductor detector can be calculated from these data.
- Measurement of SiO₂ insulating layer thickness of semiconductor sample naturally generated in air conditions using Auger Electron Spectroscopy, Data of insulating layer thickness is useful thin film analysis.
- AFM image acquisition and roughness analysis to measure change of semiconductor wafer surface with respect to various cleaning process. Suggestion for manufacture conditions of stable thin film from effect data of cleaning process.
- Effect of passivation process is analyzed from current-voltage characteristics curve and gamma response spectrum analysis. Apply of this process produced leakage current decrease and gamma energy resolution improvement.
- The lattice structure of CZT crystal was analyzed by using XRD method and orientation of crystal was only (111)-type. It was found from the result that quality of grown CZT crystal is excellent.
- CZT crystal band structure is measured by photoluminescence. It was found from the measured results that Defect area occurs in the Forbidden Band region. The quality of grown crystal and error of detector signal can be verified from the defect analysis results.
- Neutron response of ⁶LiF neutron convertor manufactured by sandwich method is quite similar and noise and energy resolution of alpha response are improved before and after 150 °C annealing process. Exfoliation of neutron convertor layer does not observe under high temperature environment and stability of radiation response verified for hot effect.

V. Application Plan of the Research Results

- Hecht and Drift Diffusion Models analyzed in this study can be applicable to the assistant calculation data for constructing semiconductor sensor analysis system
- Interaction data of incident radiation can be applicable to the basic data for the radiation transport analysis
- Simulation result of the planar semiconductor sensor can be applicable to the basic technology related with radiation detector
- GUI Semiconductor Sensor Design Code can be applicable to the previous evaluation tool
- Acquisition images of annealing semiconductor sample under 100°C, 300 °C heating condition using microscope and AFM device. These results can use as analysis data for operating characteristics of semiconductor detector under high temperature condition or thermal stress.

A large, light gray watermark of the KAERI logo is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three dots representing electrons. Below the symbol, the word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font.

KAERI

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	State of the Art	3
Chapter 3	Research Scope and Results	5
Section 1	Analysis on the Radiation Transport	5
1.	Representative Radiation Simulation Code and Electric Field Simulator	5
2.	Absorbed Energy and Electron Generation in CdZnTe (CZT) Sensor	7
3.	Interaction Characteristic of the Planar Semiconductor Sensor	9
Section 2	Semiconductor Sensor Analysis System	13
1.	Model for Investigating the Charge Collection Efficiency	14
2.	Comparison of Simulated Energy spectra	16
3.	Performance Evaluation of Semiconductor Sensor Analysis System ..	19
Section 3	GUI Semiconductor Sensor Design Code	24
1.	Geometry Input Module	24
2.	Radiation Source Input Module	25
3.	Input Module for Calculating the Charge Collection Efficiency	26
Section 4	Physical Characteristic of the Electrode and Thin Film	29
1.	Evaluation of the Wafer and Metal Thin Film	29

2. Evaluation of Semiconductor Detector	43
3. Characteristic Evaluation/Measurement of Semiconductor detector as a Function of Temperature	48
Section 5 Characteristic Evaluation/Measurement for Crystal Structure, Resistance, Band Structure of the CdZnTe (CZT)	52
1. Crystal Structure	52
2. Resistance and Band Structure	53
Section 6 Neutron Convert Screen	60
Chapter 4 Accomplishment of Research Goals and Contribution	63
4.1 Accomplishment of Research Goals	63
4.2 Contribution to Outside	65
Chapter 5 Application Plan of Research Results	66
Chapter 6 References	67

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	1
제 2 장	국내·외 기술개발 현황	3
제 3 장	연구개발 수행내용 및 결과	5
제 1 절	반도체 센서 내 방사선 거동해석	5
1.	대표적인 전산모사 코드들과 전기장 시뮬레이터들의 특징 분석	5
2.	CdZnTe(CZT) 센서내에서의 흡수에너지 및 전자생성 분석	7
3.	평판형 반도체 센서의 방사선 및 에너지별 반응특성 분석	9
제 2 절	몬테칼로 전산모사 코드를 이용한 반도체 센서 해석체계 구축	13
1.	전하포집효율을 분석하기 위한 모델	14
2.	전하포집효율을 고려한 에너지 스펙트럼과 비교려 에너지 스펙트럼의 비교	16
3.	구축된 반도체 센서 해석체계의 성능검증	19
제 3 절	GUI 기반의 반도체 센서 설계코드 개발	24
1.	몬테칼로 코드와 호환되는 Geometry 입력모듈	24
2.	사용자가 정의가능한 선원항 입력모듈	25
3.	전하포집효율을 계산하기 위한 입력모듈	26
제 4 절	반도체 센서 전극 및 박막 물리적 특성 평가	29
1.	이온주입 Wafer 분석 및 금속 박막 평가	29
2.	방사선 조사 후 반도체 검출기 평가	43

3. 온도에 따른 반도체 검출기 특성 측정 및 평가	48
제 5 절 CdZnTe(CZT) 단결정 결정 구조, 비저항, Band Structure	
물리적 특성 측정 및 평가	52
1. 단결정 결정 구조 분석	52
2. 비저항, Band Structure 평가	53
제 6 절 중성자 전환막 물리적 특성 평가	60
제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외 기여도	63
제 1 절 연구개발 목표 및 달성도	63
제 2 절 대외 기여도	65
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	66
제 6 장 참고 문헌	67

표 목 차

표 3-1-1. 몬테칼로 방법을 기반으로 하는 코드와 특성	6
표 3-2-1. 전하포집효율을 도출하기 위한 인자	17
표 3-2-2. Geant4와 MCNPX 계산을 통해 도출된 에너지별 카운트 비	19
표 3-2-3. Shaping Time에 따른 이온쌍의 이동수명시간 변화	21
표 3-5-1. PL 검사로 분석된 CdZnTe Sample 스펙트럼 및 Band Gap	58



그 림 목 차

그림 3-1-1. ATLAS 시뮬레이터의 입력과 출력	7
그림 3-1-2. CZT 센서 투과깊이에 따른 흡수선량 분포	8
그림 3-1-3. CZT 센서 깊이에 따라 생성된 이온쌍 개수	9
그림 3-1-4. 평판형 반도체 센서와 알파입자의 반응스펙트럼	10
그림 3-1-5. 평판형 반도체 센서와 베타선의 반응특성	10
그림 3-1-6. 평판형 반도체 센서와 감마선의 반응특성	11
그림 3-1-7. 몬테칼로 방법을 이용한 계산결과 실험결과의 비교	12
그림 3-2-1. 반도체 센서의 성능평가를 위한 해석체계	14
그림 3-2-2. 전자의 이동수명시간에 따른 최대 전하포집효율의 변화	15
그림 3-2-3. 양공의 이동수명시간에 따른 최대 전하포집효율의 변화	16
그림 3-2-4. Bias Voltage에 따른 최대 전하포집효율의 변화	16
그림 3-2-5. 반도체 센서 깊이에 따른 전하포집효율	17
그림 3-2-6. Geant4와 MCNPX 코드로부터 도출된 59.5 keV 감마선의 에너지스펙트럼	18
그림 3-2-7. 평판형 CZT 계측기내에서의 이온쌍 수송특성 평가를 위한 실험장비	20
그림 3-2-8. 감마선을 이용하여 도출된 전하포집효율	22
그림 3-2-9. 알파입자를 이용하여 도출된 전하포집효율	22
그림 3-2-10. 59.5 keV 감마선으로부터 도출된 에너지 스펙트럼과 실험결과 비교	23
그림 3-2-11. 5.5 MeV 알파입자로부터 도출된 에너지 스펙트럼과 실험결과 비교	23
그림 3-3-1. 반도체 센서 설계코드의 계산체계	24
그림 3-3-2. Geometry 입력부와 Visualization창	25
그림 3-3-3. 사용자가 정의가능한 선원형 입력모듈	26
그림 3-3-4. 전하포집효율을 계산하기 위한 입력모듈	26
그림 3-3-5. GUI 기반의 반도체 센서 설계코드	27
그림 3-3-6. GUI 기반의 반도체 센서 설계코드에서 도출된 에너지 스펙트럼	28
그림 3-4-1. Auger 검사 장비 모식도	29
그림 3-4-2. Depth Profiling 모식도	30

그림 3-4-3. Phosphorus가 C-face에 주입된 SiC 반도체에 대한	
Auger Spectra	30
그림 3-4-4. Boron이 Si-face에 주입된 SiC 반도체에 대한 Auger Spectra	31
그림 3-4-5. Depth Profiling: GaAs 웨이퍼의 Polishing Face에	
Phosphorus 주입	32
그림 3-4-6. Auger Spectra: GaAs 웨이퍼의 Polishing Face에	
Phosphorus 주입	32
그림 3-4-7. Depth Profiling: GaAs의 Non-polishing Face에	
Boron 주입	33
그림 3-4-8. Auger Spectra: GaAs의 Non-polishing Face에	
Boron 주입	33
그림 3-4-9. Depth Profiling: n-type 6H-SiC C Face, 이온 주입하지 않음	35
그림 3-4-10. Auger Profiling: n-type 6H-SiC C Face, 이온 주입하지 않음	35
그림 3-4-11. Depth Profiling: n-type 6H-SiC Si Face, Boron 주입	36
그림 3-4-12. Auger Profiling: n-type 6H-SiC Si Face, Boron 주입	36
그림 3-4-13. AFM(Atomic Force Microscope) 시스템 구성 요소	38
그림 3-4-14. 캔틸레버에 의한 표면 측정 방법 모식도	39
그림 3-4-15. 캔틸레버에 대한 SEM 사진	39
그림 3-4-16. 열처리 전후의 SiC 표면 AFM 사진	
(왼쪽 : 열처리 전, 오른쪽 : 열처리 후)	40
그림 3-4-17. 세척 공정 변화에 따른 Si 웨이퍼 표면 Roughness 변화	40
그림 3-4-18. 2D AFM 영상을 통한 Roughness 계산	41
그림 3-4-19. RCA 세척 공정을 사용한 Sample A AFM 영상	41
그림 3-4-20. 희석된 HF 세척 공정을 사용한 Sample B AFM 영상	42
그림 3-4-21. 아세톤 세척 공정을 사용한 Sample C AFM 영상	42
그림 3-4-22. 세척 공정 전후의 Sample A, B, C Roughness	42
그림 3-4-23. ⁶⁰ Co 대단위 감마선 조사시설	43
그림 3-4-24. 감마선 조사 후 시편 보관유리병	44
그림 3-4-25. 감마선 조사 후 SiC 반도체 시편	44
그림 3-4-26. 감마선 조사 후 SiC 시편에 대한 전류-전압특성곡선(Si-face)	45
그림 3-4-27. 감마선 조사 후 SiC 시편에 대한 전류-전압특성곡선(C-face)	45
그림 3-4-28. 감마선 조사조건에 따른 SiC 시편의 전류-전압특성곡선(C-face)	46
그림 3-4-29. 감마선 조사 후 6H-SiC 시편의 SBH	48

그림 3-4-30. 열처리 전 Au 박막 경계면 사진	49
그림 3-4-31. 열처리 후 Au 박막 경계면 사진	49
그림 3-4-32. 열처리 전후의 전류-전압특성 곡선	50
그림 3-4-33. 열처리 전후의 방사선 반응(^{238}Pu 알파선원)	50
그림 3-5-1. XRD 회절 분석법의 원리	52
그림 3-5-2. CZT 단결정의 XRD검사 결과, (111) 격자 구조	53
그림 3-5-3. Photoluminescence(PL) 검사 장비의 레이저 발생 장치	54
그림 3-5-4. Photoluminescence(PL) 검사 시스템	54
그림 3-5-5. Photoluminescence(PL) 검사 시스템 모식도	55
그림 3-5-6. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-2 CdZnTe Sample 스펙트럼	56
그림 3-5-7. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-7 CdZnTe Sample 스펙트럼	56
그림 3-5-8. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-11 CdZnTe Sample 스펙트럼	57
그림 3-5-9. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-13 CdZnTe Sample 스펙트럼	57
그림 3-5-10. CZT Sample K-11의 전류-전압특성곡선	59
그림 3-5-11. CZT Sample K-11의 비저항	59
그림 3-6-1. Au/Ni-4H SiC 검출기 표면에 증착된 ^6LiF 중성자 전환박막	60
그림 3-6-2. Au/Ni-6H SiC 검출기 표면에 증착된 ^6LiF 중성자 전환박막	61
그림 3-6-3. 열처리 이후의 ^6LiF 중성자 전환박막	61

제 1 장 연구개발과제의 개요

현재 전 세계적으로 개발되고 있는 반도체 계측기는 IV-IV 화합물인 SiC, III-V 화합물인 GaAs, InP, GaN, BN, AlN, II-VI 화합물인 CdTe, ZnSe 이외에도 HgI₂나 CdZnTe (CZT) 등이며, 이러한 화합물 반도체 검출기 중 최근 가장 활발히 연구되고 있는 검출기는 CZT이다. CZT 검출기는 경수로의 핵연료 검색기, 방사선 폐기물 상태 검색기, 차세대 RMS (Radiation Monitoring System)를 위해 개발되고 있으며 우주선 탑재용 감마선, 중성자 검출기로도 사용될 계획이다. CZT를 필두로 하는 상온 화합물 반도체 방사선 계측기는 방사선 계측분야를 한 단계 업그레이드 시킬 수 있는 차세대 방사선 계측기 기술로써 현재 전 세계적으로 활발한 연구 개발이 진행되고 있다.

국내의 경우, 방사선 및 동위원소 관련 산업이 국민 총 생산에서 차지하는 비중은 0.1 %에 불과하며 이는 미국의 1.5 %, 일본의 1.0 % 등과 비교하여 전체 산업에서 차지하는 비중이 상당히 낮은 편이다. 하지만, 방사선 관련 산업규모는 빠르게 성장하고 있으며 매년 약 5 %의 성장세를 유지, 2030년에는 2조 5,000억 원 규모의 시장을 형성할 수 있을 것으로 예상되고 있다. 이러한 빠른 성장을 뒷받침하기 위해서는 모든 방사선 관련 산업의 기반기술 중에 하나인 방사선 계측기 기술을 보유하는 것이 필수적이다.

방사선 계측기 기술은 기초과학에서부터 방사선 방호, 핵물질 통제, 의학적 이용에 이르기까지 폭넓게 활용되는 기술이다. 하지만 국내 산업은 방사선 계측기 센서에서 시스템에 이르기까지 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 세계적으로 7위의 원자력발전 국가임에도 불구하고 방사선 계측기 관련 산업에 대한 해외기술 종속국가로의 불명예는 피할 수 없는 현실이다. 이로부터 탈피하기 위해서는 방사선 계측기 관련 기반기술 개발이 무엇보다 시급히 이루어져야 한다. 국내에서는 방사선 계측기 기술 개발을 산·학·연 협동연구와 국제공동연구 등이 산발적으로 시도되고 있으나 전체 방사선 계측 기술연구 범위에 비하면 미미한 수준에 그치고 있다. 방사선 검출기 개발능력은 일부 분야에서 국제 경쟁력을 갖출 가능성이 있다고 판단되지만, 이를 뒷받침하고 확대 발전시키기 위해서는 낙후된 기반기술 개발이 선행되어야 한다. 방사선 계측기 설계 기술은 계측기의 설계 및 제작 그리고 평가에 활용되는 기술로서 방사선 계측기 및 계측기술의 국산화의 초석이 되는 중요한 기술이다. 방사선 계측기를 국산화하고자 하는 경우, 계측기의 실제 제작 기술도 중요하지만 이에 앞서 이를 평가하고 설계할 수 있는 기반기술이 반드시 선행되어야 한다.

이온챔버, 섬광형 계측기, 반도체 계측기 등 계측기의 종류에 따라 개발되어야 하는 연구내용은 조금씩 차이가 날 수도 있지만 가장 중요한 것은 계측기의 정확한 반응함수 분

석과 측정 스펙트럼을 예상할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 세계적으로 널리 사용되고 있는 전자/광자/중성자 수송용 MCNP 코드를 이용하여 반도체 센서 내 방사선 거동 해석을 위한 체계를 구축하였으며 단결정 및 박막 물리적 특성 측정 및 평가를 수행하였다.



제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

선진국에서는 방사선 계측기와 방사선 응용 계측/제어 시스템의 산업화가 이미 성숙기에 접어들고 있으며 방사선 응용 계측기를 산업용으로 활용하여 제품의 품질향상, 원가절감, 에너지절약 등 산업기술 발전에 많은 기여를 하고 있다. 또한, 반도체 기술을 이용한 첨단 검출기를 채택한 방사선 계측기의 산업화 시대가 열리고 있으며, 의료용, 산업용 응용 계측기에 적용하고자 하는 개발 경쟁에 돌입한 상태이다. 한편, 섬광체 분야에서는 1997년에 Valentine 교수가 Electron Response를 측정할 수 있는 새로운 기술을 개발, 그동안 규명이 어려웠던 여러 섬광체의 비선형성(Non-proportionality) 등을 새로이 분석해냄으로써 무기섬광체에 대한 연구를 촉진하는 계기가 되었으며 현재까지 관련 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

특히, 최근에는 CdTe/CZT를 이용한 SPECT, PET 핵의학 장비, 휴대용 RI 검색장치, 소형 XRF 장치가 개발되어 의료, 보안, 우주항공 산업분야에서 화합물 반도체를 이용한 방사선 계측장비가 상용화되고 있다. CZT 방사선 계측기 관련 선두기업 중 하나인 eV Products에서는 일반적으로 122 keV 감마선에 대하여 3.5 % 에너지 분해능, $10 \times 10 \times 8 \text{ mm}^3$ 이하의 단결정 방사선 센서를 전 세계적으로 공급하고 있다. 그리고 의료영상, 보안시장 등의 요구에 맞추어 대면적 고분해능 CZT 센서 개발이 시급히 요구되고 있는 상황이며 미국을 중심으로 Homeland Security를 위한 CZT 연구에 대규모 투자를 진행하고 있다. 현재까지 개발된 반도체 센서 해석용 모델로는 Ramo's Theorem과 Hecht 모델이 있으며 두 모델은 각각 Pixel형 반도체와 평판형 반도체 센서의 해석을 위해 주로 사용되고 있다. 또한, 두 모델은 기본적으로 동일한 방법을 이용하여 센서내 위치별 전하포집효율을 계산하고 있었는데 고려되는 인자들로는 입사방사선으로 인해 생성되는 전하들의 위치, 이동수명시간, 센서내에서의 전기장 등이 종합적으로 반영되고 있었다.

반면, 국내에서는 방사선 계측 및 계측기 기술 연구와 관련하여 체계적으로 추진되지 않아 기반 시설을 제대로 갖춘 실험실/연구실이 매우 부족한 실정이다. 또한 중장기적인 기술축적 및 관리가 미흡하고, 방사선 이용 계측분야 실험경험이 적으며 단순한 수입 보급으로 인해 방사선 이용 계측기 제조분야 산업이 매우 뒤떨어져 있는 실정이다. 최근 들어 한국원자력연구소를 중심으로 대용량 이온함과 PIN 다이오드를 이용한 Pocket Dosimeter 국산화에 성공하였으며, 산업용 수위측정기, 두께측정기의 실용화가 진행되는 등 국내의 방사선 계측기 기술 수준이 상당히 높아지고 있다. 산업체에서도 일부 벤처 기업을 중심으로 단품 응용기기가 개발되고 있으며 국내 대학의 많은 연구실에서는 열악한 연구 환경 속에서도 산발적이고 간헐적인 연구가 진행되고 있다.

SiC 반도체 센서를 비롯한 원전용 방사선 계측 기술은 원자력 발전의 안정성과 전력생산의 과잉분에대한 경제적 손실을 최소화 할 수 있는 기술임에도 불구하고 현재까지 적용가능한 방사선 센서 기술을 확보할 수 없었다. 국내 Si기반 반도체 기술은 세계적인 수준임에도 불구하고 향후 Si 시장을 대체할 전망인 화합물 반도체 소자 기술 개발은 매우 미미한 실정으로 개발자 당사자의 시설 확보 뿐 아니라 공정개발에 이르는 다양한 기술을 총체적으로 개발해야하는 어려움이 있어 국가 기술의 취약점으로 나타나고 있다.



제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 반도체 센서 내 방사선 거동해석

1. 대표적인 전산모사 코드들과 전기장 시뮬레이터들의 특징 분석

최근 몬테칼로 방법을 기반으로 하는 전산코드와 전산능력의 발달은 원자로 모델링, 방사선량 계산, 계측기 시뮬레이션 등에 새로운 경향성을 제공하고 있다. 예로, 국제원자력기구의 IAEA TRS-398 [1]과 미국의학물리학회 AAPM TG-51 [2]과 같은 표준 측정법에서도 여러 가지 물리량에 대한 교정계수를 실험과 측정으로 도출하기 어렵기 때문에 몬테칼로 방법을 기반으로 하는 전산모사 코드들을 사용하여 해당 값들을 확보하고 있는 상황이다. 특히, 표 3-1-1에 나타나 있는 MCNP [3], GEANT4 [4], EGS [5] 코드는 현재 가장 널리 사용되고 있는 전자·광자·중성자 수송용 범용코드들이며 기술된 코드들은 3차원 모델링이 가능할 뿐만 아니라 수송 알고리즘 및 핵자료 라이브러리를 지속적으로 개선시키고 있어 폭넓은 사용자그룹을 확보하고 있다. GEANT4, EGS 코드는 입자의 수송이 시작되면서부터 입자가 사라질 때까지의 모든 과정을 정확하게 추적할 수 있는 코드로서 반도체 센서 내 방사선 거동을 해석하기 위해 주로 사용되고 있음을 확인하였다. 하지만 두 코드는 시뮬레이션을 위한 모듈이 지나치게 세분화되어 있어 사용자들이 모든 기능을 숙지하는데 상당한 시간이 소요되며 특히 EGS는 Motran이라는 독창적인 언어로 코딩을 함으로써 사용자 접근성이 낮은 것으로 확인되었다.

반도체 계측기 설계를 위해서는 계측기내의 전기장 분석을 통해 생성된 이온쌍의 거동, 누출전류, 전기장 등을 필수적으로 분석해야하는데 이 같은 분석을 위해 사용되는 시뮬레이터로는 ATLAS [6], MAXWELL [7] 등이 주로 이용되고 있었다. ATLAS는 Silvaco사에서 개발한 전자장 분석 시뮬레이터로서, 반도체 소자의 전기, 빛, 열에 의한 성질을 시뮬레이션할 수 있도록 개발되었다. 2D와 3D용 모듈이 분리되어 있으며 각각 16개, 8개의 세부 하위모듈을 이용하여 반도체의 DC, AC, Time-dependant 응답을 분석할 수 있도록 하였다(그림 3-1-1 참조). 하지만 구성된 프레임이 너무 복잡하고 비용이 고가임에 따라 국내에서의 사용이 활발하지는 않은 것으로 확인되었다. 반면에, MAXWELL 코드는 Ansoft사에서 개발한 소프트웨어로서 주이용 분야가 모터나 Magnetic Head 등을 기본으로 하는 각종 Electromechanical한 제품개발이었으나 현재는 반도체 계측기 설계분야에도 널리 응용되고 있었다. 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 Conductor의 복잡한 시스템, 그리고 유전체내에서의 전기장과 전압변화를 분석하며 2D와

3D 분석이 가능한 것으로 확인되었다. 해당 소프트웨어는 상대적으로 가격이 저가이며 구성이 단순화되어 있어 국내 사용자가 상당히 많은 것으로 조사되었으며 한국원자력연구원에서 개발한 이온챔버의 설계에서도 사용된 적이 있었다.

표 3-1-1. 몬테칼로 방법을 기반으로 하는 코드와 특성

전산모사 코드	기본적인 특징
MCNP	- Monte Carlo N-Particle Transport Code(MCNP)는 중성자, 광자, 전자 수송을 위해 Los Alamos National Laboratory에서 개발한 코드임 - 방사선 차폐, 선량측정, 방사선 사진술, 의학물리 등의 여러 분야에서 응용되고 있으며 계측기 설계와 분석에도 사용되고 있음 - Time-dependant 코드이며 Fortran(425 Subroutines)과 C로 작성되어 있음
GEANT4	- Geant4는 입자가 물질내부를 통과할 때 입자의 궤적을 추적하는 Computer Simulation Toolkit임 - 고에너지 물리학, 핵물리, 가속기 물리분야 뿐만 아니라 의학, 항공우주에까지 활용되는 프로그램으로 객체지향적 구조로 설계되어 있음 - C++로 만들어져 있으며 17개의 기본클래스로 구성
EGS	- Electron Gamma Shower(EGS)는 물질 내부에서의 전자와 양전자, 그리고 광자간의 상호작용에 의한 입자의 궤적을 추적하는 Computer Simulation 프로그램임 - Slac의 EGS 웹페이지를 통해서 별도의 설치과정 없이 CGI를 이용 간단한 시뮬레이션도 가능함

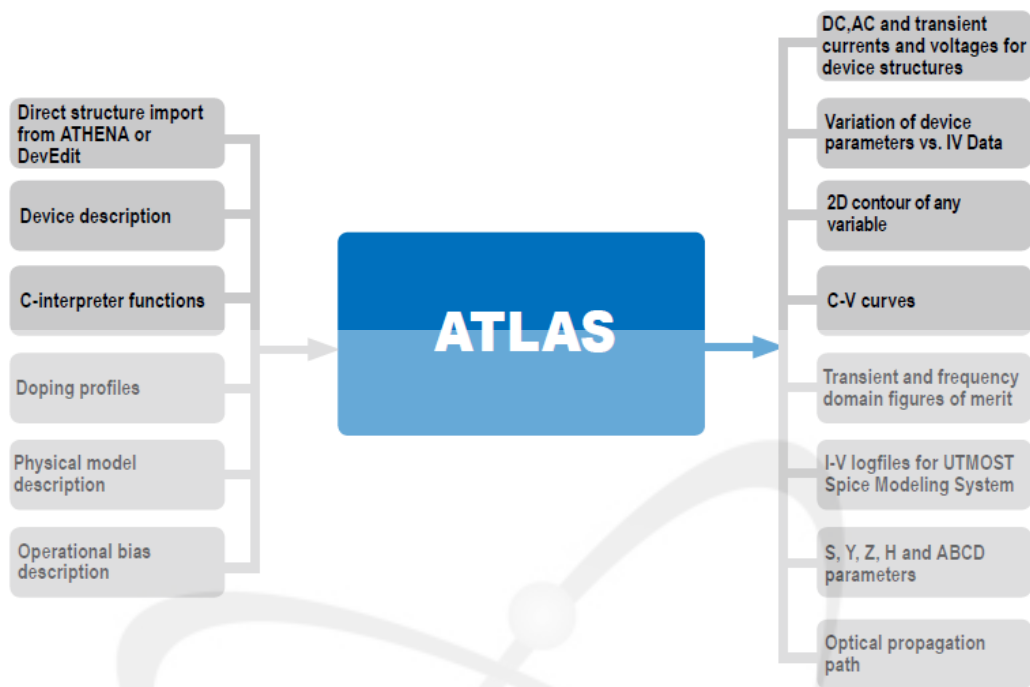


그림 3-1-1. ATLAS 시뮬레이터의 입력과 출력

2. CdZnTe(CZT) 센서내에서의 흡수에너지 및 전자생성 분석

과거에 다양한 연구자들이 각기 다른 몬테칼로 코드를 이용하여 방사선의 흡수선량 분포를 계산한 적이 있었다 [8]. 이때 각 코드별 계산 알고리즘과 사용된 Stopping Power의 라이브러리 차이로 인해 약간씩 상이한 결과를 보이기는 했으나 최대 차이가 약 5% 정도로 거의 동일한 결과가 도출되었다. 따라서 본 연구에서는 대표코드로서 MCNPX를 선정하였으며 이를 이용하여 CZT 센서내에서의 방사선 흡수에너지와 이온쌍 생성분포를 분석하였다. MCNPX 계산에서 사용한 감마선 Cross-section 라이브러리는 ENDF B_IV에 EPDL 89 데이터가 반영된 ENDF B_IV/89를 사용하였으며 전자선의 경우는 'el' 대신 새로 자료가 보강된 'el03'을 사용하였다. 또한, 방사선원은 반도체 센서로부터 1m 떨어진 곳에서 센서중앙을 향하여 입사되도록 설정하였으며 알파 (Pu^{238} , 5.4999 MeV), 베타 (P^{32} , 1.71 MeV), 감마선을 수송하여 결과를 비교해보았다.

그림 3-1-2에서는 CZT 센서 투과깊이에 따른 방사선 흡수에너지 분포를 보여주고 있다. 알파입자는 0.01cm내에서 모든 에너지가 흡수되었으나 베타선의 경우, 0.1cm 내에서 대부분 에너지가 흡수되고 방사선 흡수에너지가 가장 큰 지점이 0.02cm ~ 0.03cm지점임을 알 수 있었다. 또한 감마선 에너지가 100 keV 이하일 경우에는, 방사선 흡수에너지 분포가 투과깊이에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보였으며 해당에너지 영역대의 방

사선 계측 시에는 센서의 두께가 5mm 정도면 충분할 것으로 예상되었다. 하지만, 100 keV 이상의 감마선일 경우, 센서내에서의 흡수에너지 분포가 거의 일정하게 감소하였으며 계측효율도 상당히 낮고 전에너지피크의 Count도 적으며 낮은 에너지영역에서의 Noise가 많을 것으로 예측되었다. CZT 센서의 전기적인 신호는 입사된 방사선이 센서 내 물질과 반응하여 이온쌍을 생성한 후, 각 이온들이 Cathode와 Anode 사이의 전위차에 의해 재결합(Recombination)되지 않고 센서 양끝단의 전극에 포집되면서 발생한다. 하지만, MCNPX 코드는 전위차에 의해 포집되는 이온쌍들의 출력전류를 직접 계산할 수 없다. 따라서 CZT 센서내에서의 흡수에너지를 먼저 계산 후 흡수선량을 W-Value (센서 내에서 한 개의 이온쌍을 생성하는데 필요한 평균에너지, 4.6 eV)로 나누어 계산하였다 (그림 3-1-3 참조).

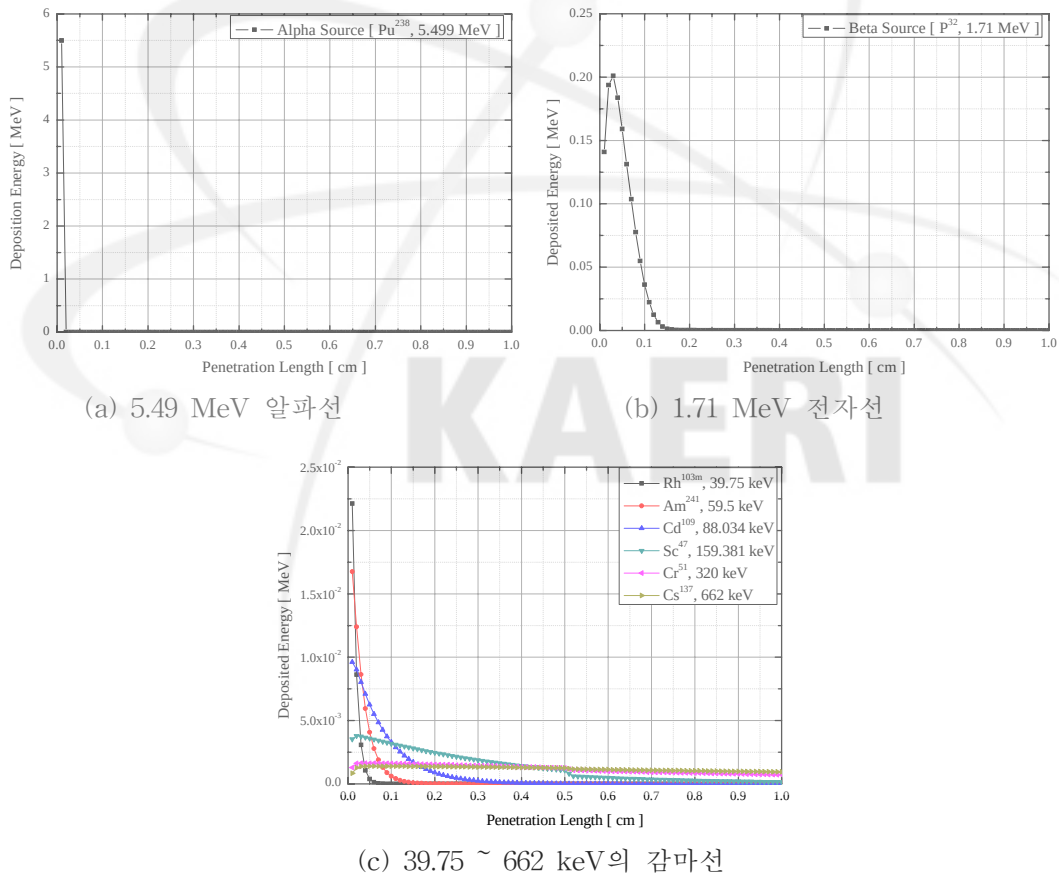


그림 3-1-2. CZT 센서 투과깊이에 따른 흡수선량 분포

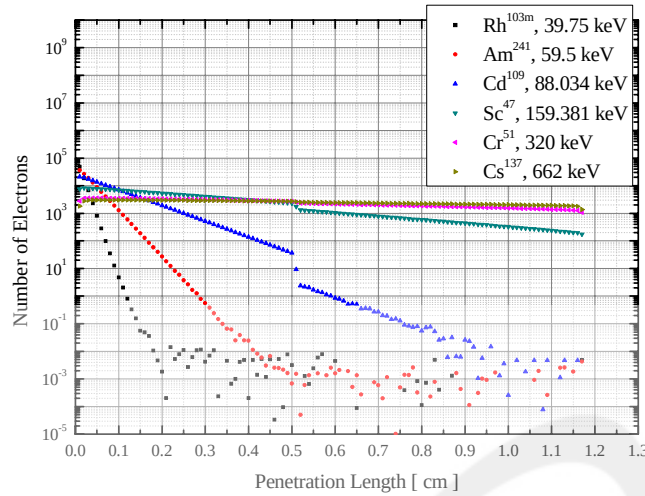


그림 3-1-3. CZT 센서 깊이에 따라 생성된 이온쌍 개수

3. 평판형 반도체 센서($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)의 방사선 및 에너지별 반응특성 분석

반도체 센서 내 방사선 거동해석을 위하여 한국원자력연구원에서 개발한 평판형 반도체 센서(Cathode(Platinum), Anode(Platinum): 10nm, CZT: $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)를 Benchmarking 모델로 선정하였으며 다양한 방사선원에 따른 반응특성을 분석하였다. 특성분석을 위한 선원으로는 알파(Pu^{238} , 5.4999 MeV), 베타 (P^{32} , 1.71 MeV), 감마선 Rh^{103m} (39.75 keV), Am^{241} (59.5 keV), Cd^{109} (88.034 keV), Sc^{47} (159.381 keV), Cr^{51} (320 keV), Cs^{137} (662 keV) 등을 이용하였다. 계산결과는 그림 3-1-4 ~ 그림 3-1-6에 나타내었으며 방사선원은 센서로부터 수직으로 1m 떨어진 지점에 위치하도록 하였다.

알파선은 Cathode에서 250 keV 정도의 에너지를 잃고 난 이후에 센서와 반응하는 것으로 확인되었으며 베타선은 Cathode에 1.5 keV 정도의 에너지를 부여하고 센서내로 입사하였다. 또한 CZT 센서와 베타선과의 반응 스펙트럼을 분석한 결과, 컴프턴 산란에 의한 영향이 모든 에너지영역에서 발생되고 있음을 알 수 있었다. 감마선의 경우, 낮은 에너지 영역에서 Cd, Zn, Te의 Escape Peak가 확인되었으며 100 keV 이하 선원에서는 광전흡수 반응이 주도적으로 발생되어 전에너지피크가 확연하게 나타나고 있었다. 반면, 100 keV 이상의 에너지를 갖는 감마선의 경우, 전에너지피크보다 컴프턴 산란에 의한 낮은 에너지영역의 Noise가 더 크게 나타났으며 5mm 두께의 센서에서는 계측효율이 상당히 낮을 것으로 예상되었다. 그리고 입사 감마선에 의해 생성된 전자들의 센서 내 분포를 분석해 본 결과, 베타선과 100 keV 이하 감마선의 경우는 센서두께 5mm 내에서 모든 전자들이 에너지를 부여하는 반면 100 keV 이상의 감마선에 의해 생성된 전자는 외부로 빠져나가는 비율이 상당히 많아 누출되는 전류가 많을 것으로 예상되었다.

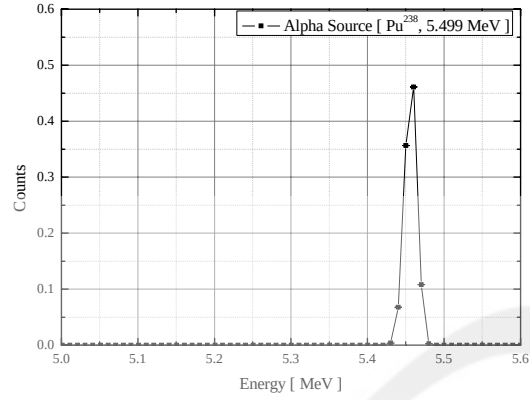
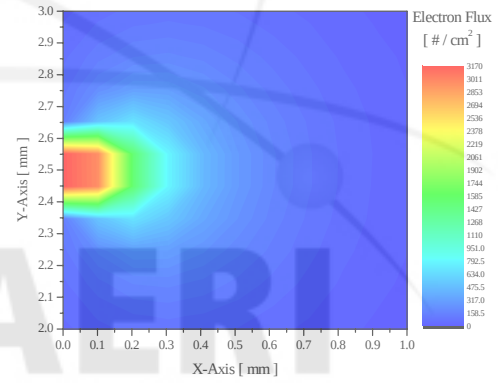
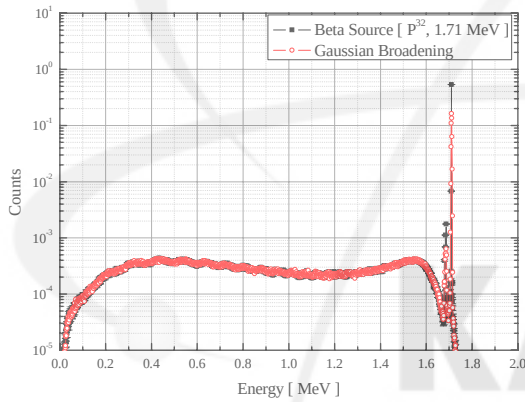


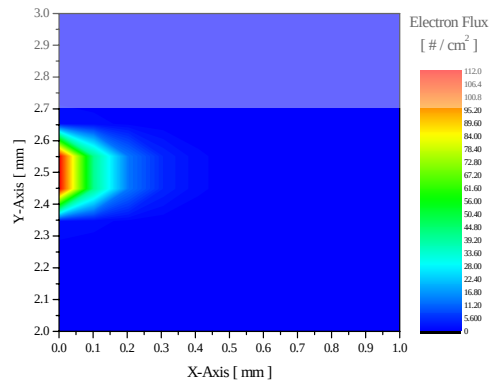
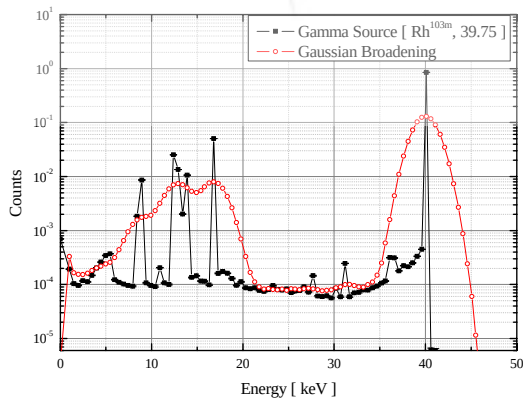
그림 3-1-4. 평판형 반도체 센서($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)와 알파입자의 반응스펙트럼



(a) 베타선과의 반응스펙트럼

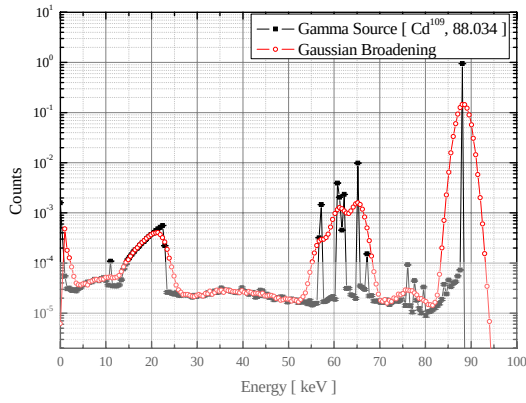
(b) 센서 내 전자들의 분포 스펙트럼

그림 3-1-5. 평판형 반도체 센서와 베타선의 반응특성

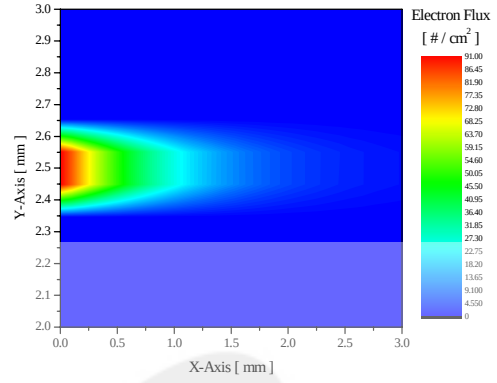


(a) 39.75 keV 감마선과의 반응스펙트럼

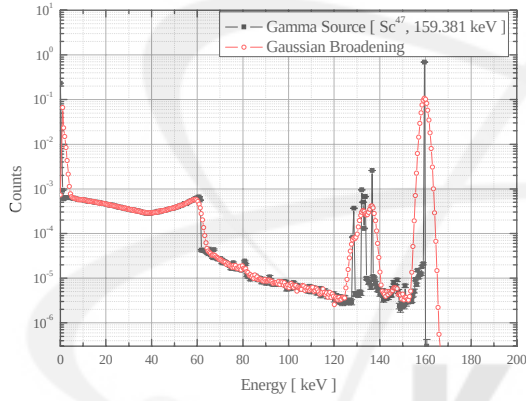
(b) 전자들의 분포 스펙트럼 (39.75 keV)



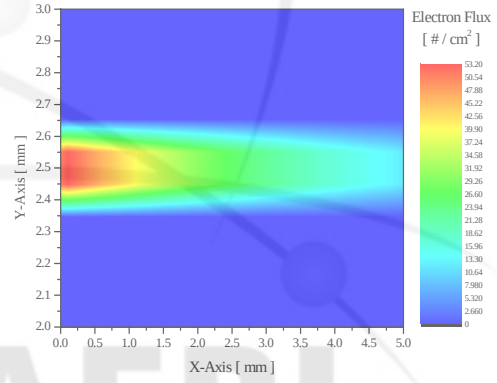
(c) 88.03 keV 감마선과의 반응스펙트럼



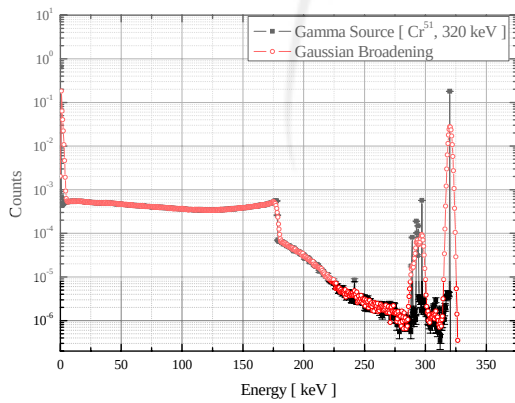
(d) 전자들의 분포 스펙트럼 (88.03 keV)



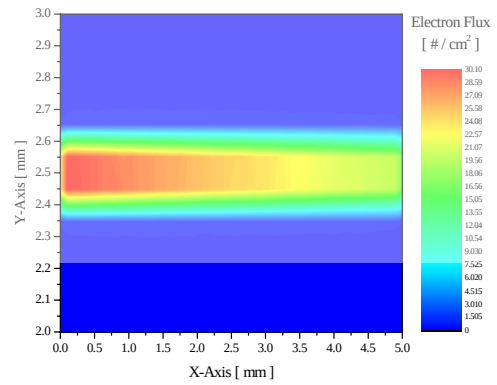
(e) 159.38 keV 감마선과의 반응스펙트럼



(f) 전자들의 분포 스펙트럼 (159.38 keV)

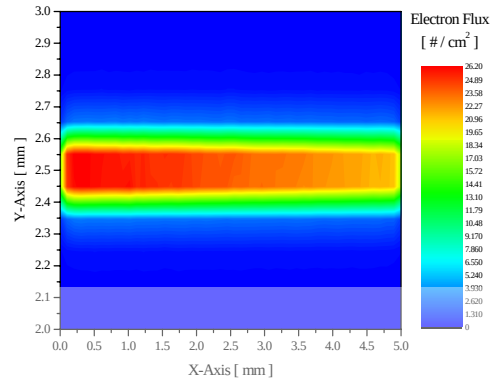
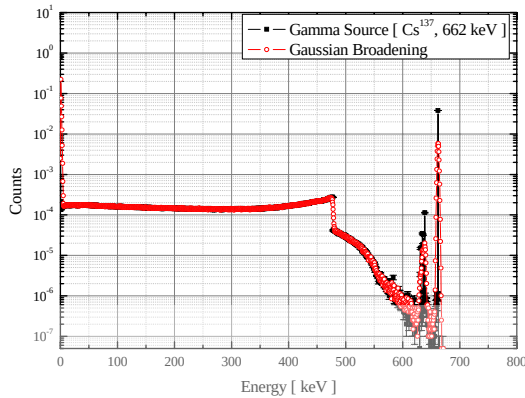


(g) 320 keV 감마선과의 반응스펙트럼



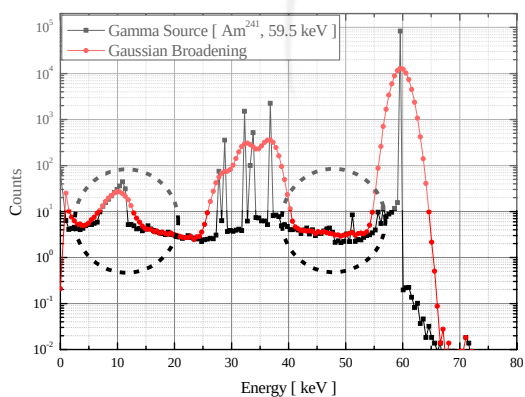
(h) 전자들의 분포 스펙트럼 (320 keV)

그림 3-1-6. 평판형 반도체 센서와 감마선의 반응특성 (계속)

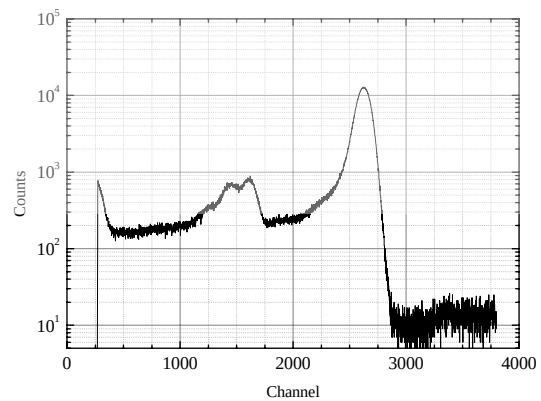


(i) 662 keV 감마선과의 반응스펙트럼 (j) 전자들의 분포 스펙트럼 (662 keV)
그림 3-1-6. 평판형 반도체 센서와 감마선의 반응특성

본 연구에서 도출된 계산결과의 정확성을 평가하기 위하여 Am^{241} (59.5 keV) 감마선원의 예상 반응스펙트럼과 실제 측정된 스펙트럼과의 비교/검증을 수행하였으며 결과는 그림 3-1-7에 나타내었다. 계산과 측정을 통한 반응 스펙트럼을 분석해 보면, (비록 측정결과와 스펙트럼이 Calibration 되어있지 않지만) 모든 에너지영역에서 동일한 경향을 보이고 있으며 32 keV, 36 keV에서 Te와 Cd의 Escape Peak을 확인할 수 있다. 또한 전에너지피크와 Escape Peak의 카운트 높이가 정확하게 일치하는 것도 확인할 수 있었다. 하지만 계산된 결과에는 이온쌍의 전하포집효율이 고려되어 있지 않아 피크아랫부분에 존재하는 Tail이 모사되지 않았으며 보다 정확한 스펙트럼 도출을 위해서는 센서내 위치에 따른 전하포집효율이 필수적으로 고려되어야 함을 알 수 있었다.



(a) 계산결과



(b) 실험결과

그림 3-1-7. 몬테칼로 방법을 이용한 계산결과와 실험결과의 비교

제 2 절 몬테칼로 전산모사 코드를 이용한 반도체 센서 해석체계 구축

CdZnTe(CZT) 센서는 다양한 반도체 물질들 중에서도 높은 원자번호(Cd^{48} , Zn^{30} , Te^{52})와 충분한 Bandgap 에너지(1.52 eV)를 가지고 있어 무기섬광형 계측기들에 비해 방사선에 대한 에너지 분해능이 매우 좋은 것으로 알려져 있다 [9]. 이 같은 장점들 외에 상온에서도 작동이 가능하기 때문에 의료영상 및 고에너지 천문학 등에도 응용되고 있으며 전 세계의 계측장비 개발업체들에서는 고성능 CZT를 성장 및 개발하기 위해 막대한 자금을 투자하고 있는 것으로 알려져 있다. 하지만, 해당 반도체 센서는 낮은 이온쌍 수송특성을 가지고 있어 입사방사선에 의해 생성된 전자와 양공을 각 전극(Cathode와 Anode)에서 완벽하게 포집하지 못하는 단점이 있으며 이 같은 단점은 그림 3-1-7에서도 확인할 수 있듯이 전에너지피크 하단부에 생기는 Tail 효과와 스펙트럼의 상당한 왜곡을 발생시킨다 [10]. 따라서 CZT 계측기의 방사선 반응특성을 정확하게 분석하기 위해서는 센서내에서의 이온쌍 거동을 분석하여 각 전극에서의 전하포집효율을 필수적으로 계산/반영해주어야 한다.

본 연구에서는 위에서 언급된 내용들을 바탕으로 반도체 센서 해석을 위한 체계를 국내최초로 구축하였으며 이는 그림 3-2-1에 나타내었다. 본 해석체계는 한국원자력연구원 에서 제작된 반도체 센서의 성능평가 및 방사선 거동해석을 위하여 개발되었으며 (1) 전자와 양공의 수송특성을 도출하는 부분과 (2) 각 위치별 전하포집효율이 반영된 정확한 에너지스펙트럼 도출부로 구성되어 있다. 센서내에서의 전자와 양공 수송특성(이동수명시간)은, 계측기 부여전압에 따른 측정결과의 변화를 본 연구에서 선정한 해석모델에 적용함으로써 해당결과가 도출될 수 있도록 하였다. 그리고 센서내 위치에 따른 입사방사선별 흡수에너지는 MCNPX 코드를 통해 도출되며 각 전극에 포집되는 전하량(에너지)은 센서내 위치별 전하포집효율과 MCNPX 계산결과가 조합되어 도출될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 선정한 전하포집효율 모델과 구축된 해석체계를 통해 도출된 계산결과, 그리고 실험결과와의 비교 등에 관한 상세한 내용은 다음과 같다.

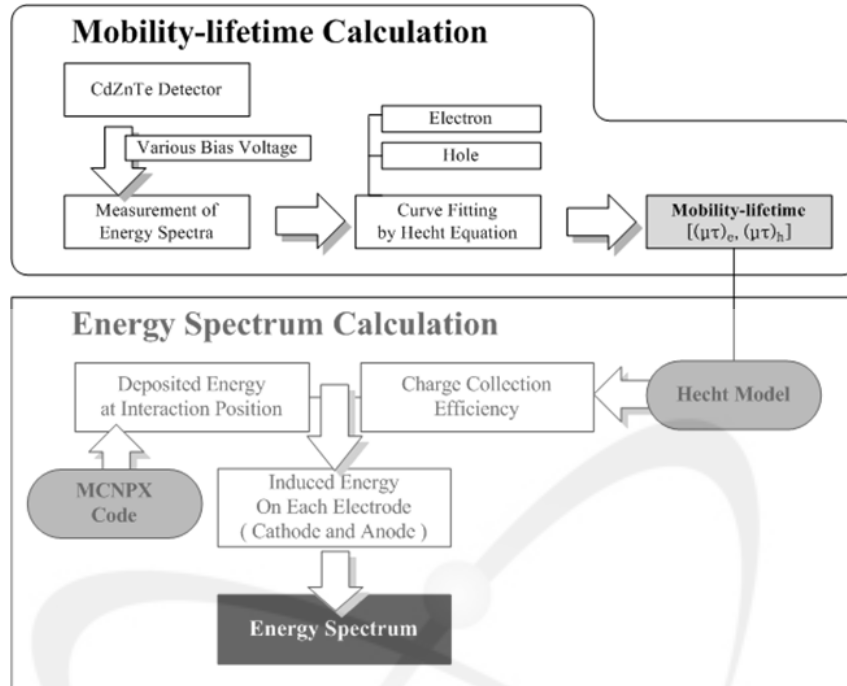


그림 3-2-1. 반도체 센서의 성능평가를 위한 해석체계

1. 전하포집효율을 분석하기 위한 모델

현재까지 개발된 반도체 센서 해석용 모델로는 Ramo's Theorem과 Hecht 모델이 있으며 두 모델은 각각 Pixel형 반도체와 평판형 반도체 센서의 해석을 위해 주로 사용되고 있었다 [11]. 또한, 두 모델은 기본적으로 동일한 방법을 이용하여 센서내 위치별 전하포집효율을 계산하고 있었는데 고려되는 인자들로써 입사방사선으로 인해 생성되는 전하들의 위치, 이동수명시간, 센서내에서의 전기장 등이 종합적으로 반영되고 있었다. 특히, 본 연구대상은 평판형 반도체 형태임에 따라 Hecht 모델에 관한 내용만을 자세히 다루었으며 세부적인 내용은 다음과 같다.

평판형 반도체 센서해석을 위한 Hecht 모델은 Drift-Diffusion 모델에 (1) 센서내에서의 전기장은 균일하다고 가정하고 (2) 시간에 따른 전자들의 밀도변화를 무시함으로써 도출되는 일종의 단순모델이었다. Hecht 모델의 관계식은 식 3-2-1에 나타내었으며 위치에 따른 전하포집효율을 각 전극에 포집되는 전하량과 입사방사선으로부터 발생된 총 전하량의 비를 통해 도출하고 있었다.

$$\eta(x) = \frac{\lambda_e}{D} (1 - \exp(-\frac{D-x}{\lambda_e})) + \frac{\lambda_h}{D} (1 - \exp(-\frac{x}{\lambda_h})) \quad (\text{식3-2-1})$$

여기에서, $\lambda_e = E \times (\mu\tau)_e$, $\lambda_h = E \times (\mu\tau)_h$

x = Cathode에서부터 이온쌍 생성지점까지의 거리

D = 센서의 두께

$(\mu\tau)_e$, $(\mu\tau)_h$ = 전자와 양공의 이동수명시간

전하포집효율을 도출하기 위해 사용되는 Hecht 모델의 민감도를 분석하기 위해 전자와 양공의 이동수명시간과 Bias Voltage를 변화시키며 각 위치별 전하포집효율 그리고 최대 전하포집효율의 변화량을 분석해보았다(그림 3-2-2 ~ 그림 3-2-4 참조). 전자의 이동수명시간이 $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ 에서 $9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ 로 증가함에 따라 각 위치별 전하포집효율도 급격하게 동반상승하였으며 이동수명시간이 $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ 일 경우에는 최대 전하포집효율이 68.5%에 불과했던 반면에, $9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ 에서는 92.8%로 변화량이 무려 24%에 달했다. 또한, 양공의 이동수명시간의 변화는 전자와 달리 각 위치별 전하포집효율과 최대 전하포집효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었으나 Bias Voltage의 변화는 전자의 이동수명시간 변화와 마찬가지로 각 위치별 전하포집효율과 최대 전하포집효율에 매우 큰 영향을 미치고 있었다.

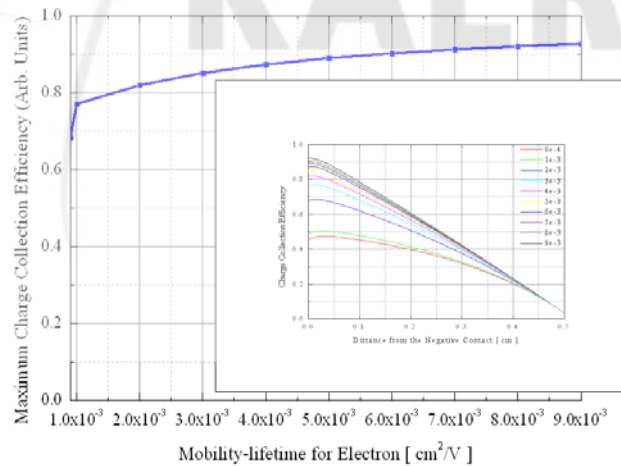


그림 3-2-2. 전자의 이동수명시간에 따른 최대 전하포집효율의 변화
(Bias Voltage= 300 V, $(\mu\tau)_h = 6.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$)

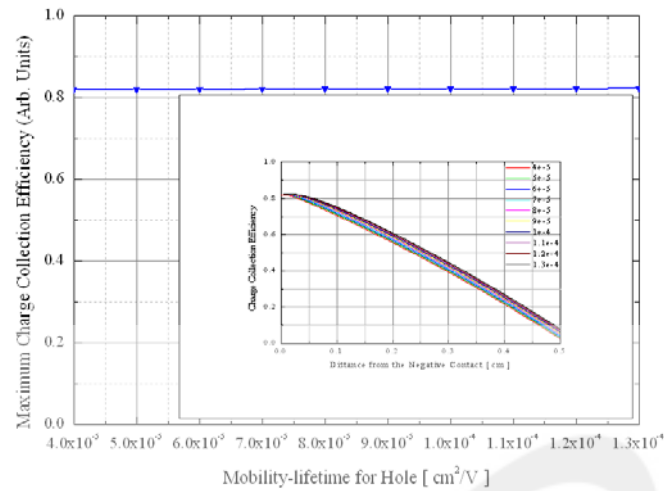


그림 3-2-3. 양공의 이동수명시간에 따른 최대 전하포집효율의 변화
(Bias Voltage= 300 V, $(\mu\tau)_e = 4.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$)

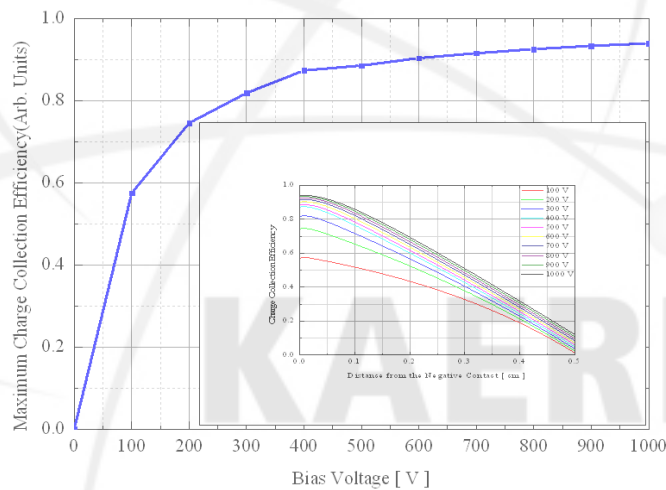


그림 3-2-4. Bias Voltage에 따른 최대 전하포집효율의 변화
($(\mu\tau)_e = 4.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$, $(\mu\tau)_h = 6.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$)

2. 전하포집효율을 고려한 에너지 스펙트럼과 비고려 에너지 스펙트럼의 비교 [10]

본 연구에서는 구축된 반도체 센서 해석체계를 바탕으로 검증실험을 수행하기에 앞서 전하포집효율을 고려한 에너지스펙트럼과 비고려 에너지 스펙트럼과의 분명한 차이를 계산을 통해 비교/분석해보았다. 반도체 계측기는 한국원자력연구원에서 개발한 $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ CZT 계측기를 대상으로 하였으며 계산을 위한 코드는 Geant4와 MCNPX를 이용하였다. 방사선원은 Am²⁴¹ 동위원소에서 방출되는 59.5 keV 광자가 계측기로부터 1m 떨어

진 위치에서 Cathode면의 중심부를 향해 입사한다고 가정하였으며 전하포집효율을 도출하기 위한 인자는 표 3-2-1과 같이 가정하였다. 그리고 에너지 스펙트럼간의 차이를 분석하기 위해 Hecht 모델로부터 도출된 전하포집효율은 Geant4 코드의 계산결과에 반영하였으며 MCNPX 코드로부터 도출된 결과는 전하포집효율에 관한 영향을 고려하지 않았다.

표 3-2-1. 전하포집효율을 도출하기 위한 인자

센서의 크기	$5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$
센서 밀도	6.1 g/cm^3
이온쌍 생성 에너지	4.6 eV
전자의 이동수명시간	$3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$
양공의 이동수명시간	$5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$
Bias Voltage	500 V

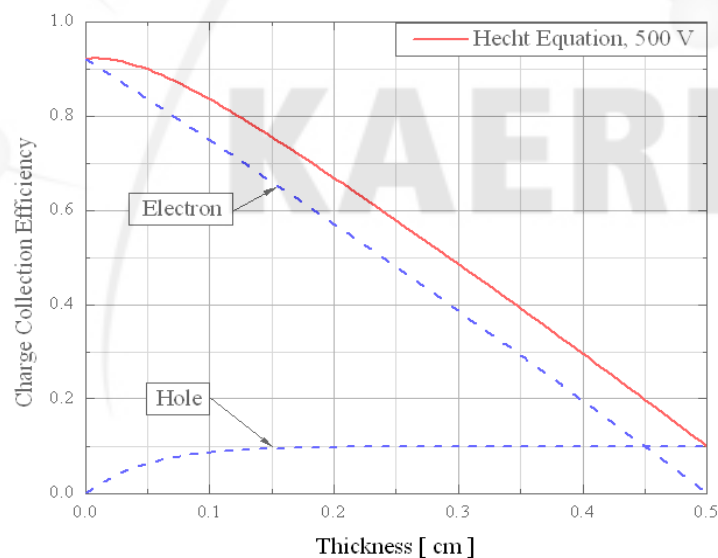


그림 3-2-5. 반도체 센서 깊이에 따른 전하포집효율

그림 3-2-5에서는 Hecht 모델을 통해 도출된 반도체 센서내 위치별 전하포집효율을 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 포집된 전하의 대부분은 전자가 Anode로 이동함으로써 확보되었으며 양공은 일부만이 써 확보되었으므로 이동하여 포집되었다. 이 같은 현상은 전자의 평균이동거리가 양공에 비해 대략 40배 이상 길기 때문에 Anode로의 이동

이 많았던 것으로 판단되며 최대 전하포집효율은 입사면(Cathode)으로부터 0.1mm 위치에서 92%를 나타내었다.

그림 3-2-6에는 59.5 keV 감마선이 CZT 계측기로 입사했을 때, 예상되는 에너지 스펙트럼에 전하포집효율을 고려한 결과와 전하포집효율을 고려하지 않은 에너지 스펙트럼과의 비교 그래프를 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 전하포집효율을 고려한 Geant4 결과는 최대 전하포집효율이 92%이기 때문에 대략 55 keV에서 전에너지피크가 생성됨을 알 수 있다. 또한 Geant4 결과는 Tail 효과가 모사되어 전에너지피크의 형태가 Gaussian 분포와는 달랐던 반면에 MCNPX 결과에서는 Tail 효과가 전혀 모사되어 있지 않음을 확인할 수 있었다.

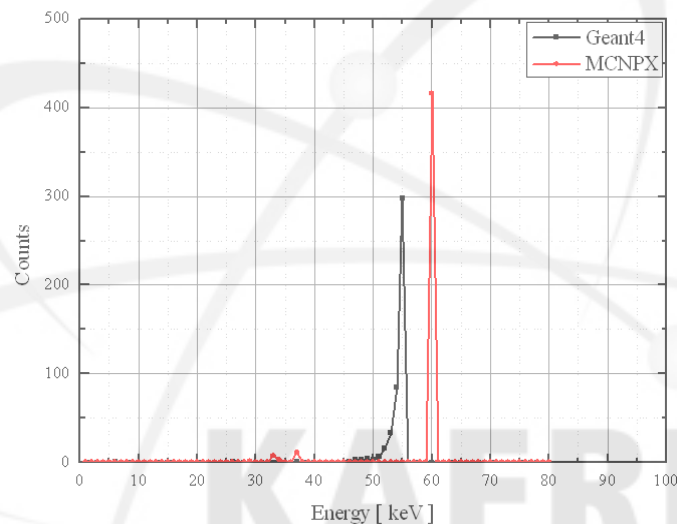


그림 3-2-6. Geant4와 MCNPX 코드로부터 도출된 59.5 keV 감마선의 에너지 스펙트럼

또한, 에너지스펙트럼에 포함되어 있는 Tail 효과의 정량적 분석을 수행하기 위해 각 에너지영역별 카운트를 전에너지피크의 카운트로 나누어 계산해보았다(표 3-2-2 참조). Tail이 발생된 영역에서의 카운트는 저에너지에서 고에너지로 이동함에 따라 급격하게 상승(N-9에서 N-1로 에너지영역 이동했을 때)하였다. 특히, Geant4 계산에서의 Tail 효과는 전에너지피크 대비 최대 29%까지 발생했던 반면에 MCNPX 계산에서는 0.03%만 발생된 것으로 확인되었다. 따라서 전하포집효율을 고려한 경우와 고려되지 경우에 Tail 효과는 대략 1000배 정도까지 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

표 3-2-2. Geant4와 MCNPX 계산을 통해 도출된 에너지 영역별 카운트 비

에너지 영역 (keV)	에너지영역별 카운트/전에너지피크 카운트	
	Geant4	MCNPX
N-1	29.0	0.03
N-2	11.0	0.02
N-3	5.0	0.02
N-4	2.0	0.01
N-5	1.0	0.01
N-6	1.0	0.01
N-7	1.0	0.01
N-8	1.0	0.01
N-9	1.0	0.01

*N은 각 계산에서 전에너지피크가 발생된 에너지영역

3. 구축된 반도체 센서 해석체계의 성능검증

본 연구에서 구축한 반도체 센서 해석체계의 성능검증을 위해 CZT 계측기의 특성 및 효율을 대표할 수 있는 중요한 인자, 계측기내에서 생성된 이온쌍의 거동을 정확하게 해석하기 위한 전자와 홀의 이동수명시간(Mobility-lifetime Product)을 우선 측정하였다. 해당인자를 도출하기 위한 실험에서 상당한 영향을 미칠 수 있는 Amplifier의 Shaping Time에 대한 민감도 또한 분석하였으며 최적화된 상태에서의 결과 값을 전하포집효율을 계산하기 위해 사용되는 Hecht 모델에 반영하였다. 전자와 홀의 이동수명시간 측정을 위해 Am^{241} 동위원소에서 방출되는 5.5 MeV 알파입자와 59.5 keV 감마선을 동시에 이용하였으며 두 종류의 방사선으로부터 도출된 에너지스펙트럼을 측정결과와 비교하였다. 실험과 관련된 상세한 내용 및 도출결과는 다음과 같다.

분석을 위한 계측기는 한국원자력연구원에서 개발한 CZT 계측기와 거의 동일한 성능 및 제원을 갖는 eV Products의 $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$ CZT 계측기를 이용하였으며 상세한 내용은 그림 3-2-7에 나타내었다. 해당계측기로부터 발생된 신호는 Preamplifier와 Amplifier(ORTEC 590A)를 이용하여 신호처리를 수행하였으며 Amplifier의 Shaping

Time은 0.5 μs 에서 3 μs 까지 변화시키며 민감도분석을 수행하였다. 측정 스펙트럼은 ORTEC 919E MCA로부터 확보되었으며 Bias Voltage를 -200 V에서 200 V까지 변화시키며 에너지스펙트럼의 변화를 분석하였다.

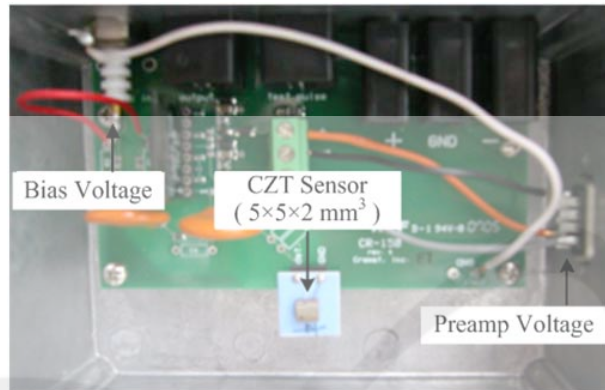


그림 3-2-7. 평판형 CZT 계측기내에서의 이온쌍 수송특성 평가를 위한 실험장비

Shaping Time이 0.5 μs 에서 3 μs 까지 변화될 때, Am^{241} 동위원소에서 방출되는 두 종류의 방사선을 이용하여 이온쌍의 이동수명시간을 측정하였으며 이를 표 3-2-3에 나타내었다. 홀의 이동수명시간은 사용된 방사선의 종류에 관계없이 Shaping Time이 증가됨에 따라 서서히 증가하였으나 전자의 이동수명시간은 방사선의 종류에 따라 약간은 상이한 결과를 나타내고 있었다. 감마선으로부터 도출된 결과는 변화폭이 상대적으로 컸던 반면, 알파입자로부터 도출된 전자의 이동수명시간은 상당히 안정적인 분포를 가지고 있었다. 그리고 전자와 홀의 이동수명시간의 비($(\mu\tau)_e/(\mu\tau)_h$)는 Amplifier의 Shaping Time이 증가함에 따라 급격히 감소하여 가장 짧은 Shaping Time 0.5 μs 에서의 값에 절반까지 감소하였다. 이상과 같은 결과를 통해, Shaping Time이 이온쌍의 이동수명시간 도출에 상당한 영향을 미치고 있었으며 감마선을 이용한 방법이 해당변화에 약간은 더 민감한 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

표 3-2-3. Shaping Time에 따른 이온쌍의 이동수명시간 변화

사용된 방사선	Shaping Time (μs)	$(\mu\tau)_e$ (cm^2/V)	$(\mu\tau)_h$ (cm^2/V)	$(\mu\tau)_e / (\mu\tau)_h$
59.5 keV 감마선	0.5	1.36×10^{-3}	6.66×10^{-5}	20.42
	1.5	1.52×10^{-3} (Case 1)	1.15×10^{-4} (Case 2)	13.22
	3.0	2.23×10^{-3}	2.03×10^{-4}	10.99
표준편차(σ)		3.78×10^{-4}	5.65×10^{-5}	-
사용된 방사선	Shaping Time (μs)	$(\mu\tau)_e$ (cm^2/V)	$(\mu\tau)_h$ (cm^2/V)	$(\mu\tau)_e / (\mu\tau)_h$
5.5 MeV 알파입자	0.5	5.40×10^{-4}	6.16×10^{-5}	8.77
	1.5	7.15×10^{-4}	1.12×10^{-4}	6.38
	3.0	6.35×10^{-4} (Case 3)	1.39×10^{-4} (Case 4)	4.57
표준편차(σ)		7.15×10^{-5}	3.21×10^{-5}	-

그림 3-2-8 ~ 그림 3-2-9에서는 위에서 도출된 이온쌍의 이동수명시간을 Hecht 모델에 적용하여 도출된 전하포집효율중 최적상태라고 판단된 결과를 보여주고 있다. 감마선을 이용한 실험에서는 1.5 μs Shaping Time이 가장 안정적이었으며 Hecht 모델을 이용한 Fitting 그래프와 95%이상의 일치율을 나타내었다. 반면에 알파입자를 이용한 실험에서는 Shaping Time이 증가할수록 결과가 안정적이었으나 도출된 결과가 기존에 알려져 있던 전자의 이동수명시간에 비해 절반이상 저평가되어 있는 것으로 판단되었다. 따라서 도출된 전자와 홀의 이동수명시간 정확성을 평가하기 위해 각 인자로부터 도출된 전하포집효율을 에너지 스펙트럼에 반영하여 실험결과와 비교하였다.

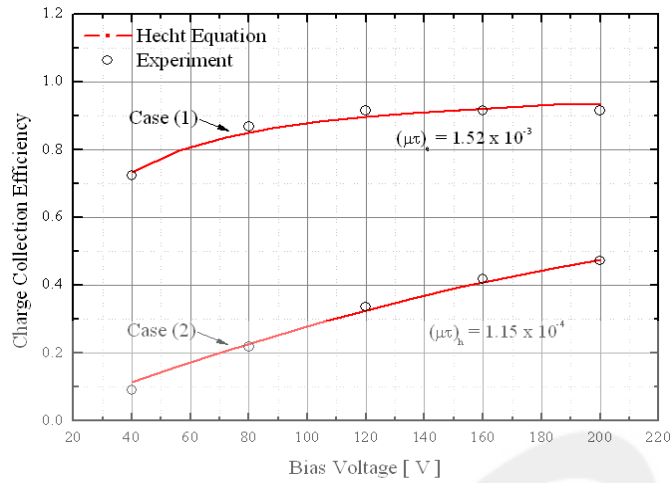


그림 3-2-8. 감마선을 이용하여 도출된 전하포집효율
(Shaping Time= 1.5 μ s)

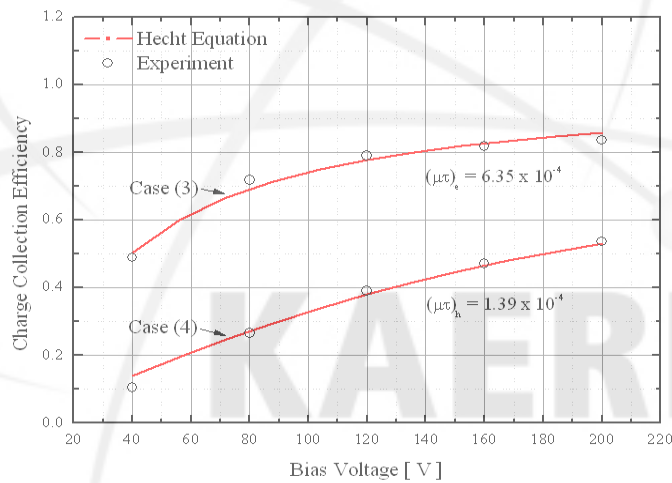


그림 3-2-9. 알파입자를 이용하여 도출된 전하포집효율
(Shaping Time= 3 μ s)

그림 3-2-10 ~ 그림 3-2-11에서는 (최적상태에서) 도출된 이온쌍 이동수명시간을 Hecht 모델에 반영하여 확보된 전하포집효율과 MCNPX 코드를 이용하여 계산된 결과를 서로 조합하여 도출된 감마선의 에너지 스펙트럼이다. 감마선으로부터 도출된 이온쌍의 이동수명시간을 반영한 에너지 스펙트럼은 실험결과와 전 에너지 영역에서 매우 잘 일치하고 있는 반면에 알파입자로부터 도출된 에너지 스펙트럼은 실험결과와 약간 상이한 경향을 보이고 있었다. 그림 3-2-11에 표시되어 있는 Region 1에서는 피크높이와 위치가 서로 차이가 있었으며 Region 2에서는 전에너지피크 하단부의 Tail이 정확하게 묘사되어 있지 않음을 알 수 있었다. 결과적으로 감마선을 이용한 방법이 Shaping Time에 대한

민감도는 상대적으로 높지만 정확한 에너지 스펙트럼을 도출하는데 매우 효율적임을 알 수 있었다. 현재까지 수행된 내용 및 결과를 바탕으로 국내최초로 구축된 반도체 센서 해석체계를 평가해 보면, 센서내 이온쌍 수송특성을 평가하는데 매우 적합하며 계산으로부터 도출된 에너지 스펙트럼이 실험결과를 충분히 예측 가능할 정도의 정확성을 확보하고 있었다.

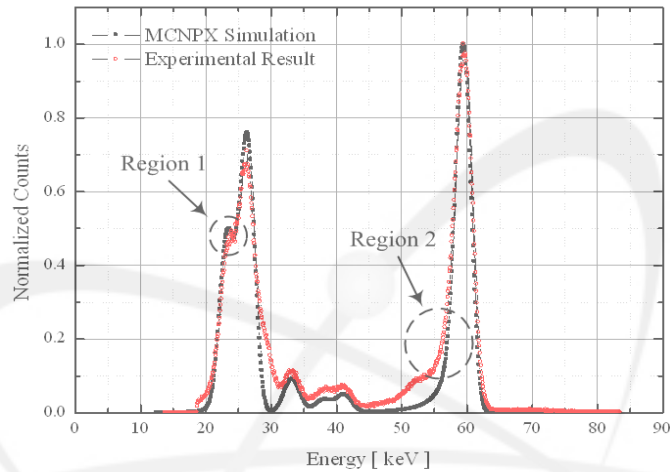


그림 3-2-10. 59.5 keV 감마선으로부터 도출된 에너지 스펙트럼과 실험결과 비교

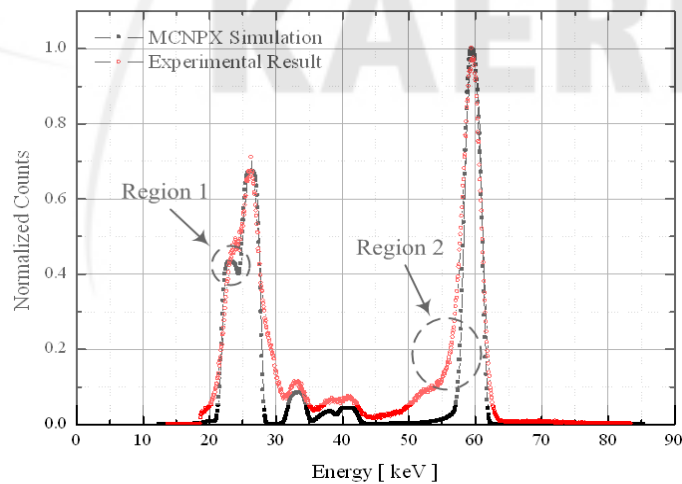


그림 3-2-11. 5.5 MeV 알파입자로부터 도출된 에너지 스펙트럼과 실험결과 비교

제 3 절 GUI 기반의 반도체 센서 설계코드 개발

본 연구에서는 반도체 센서를 설계하기 전에 필수적으로 수행되어야 하는 방사선 거동 해석 및 반응특성 분석을 위한 GUI 기반의 설계코드를 개발하였다. 개발한 설계코드는 크게 몬테칼로 코드와 호환되는 Geometry 입력모듈과 사용자가 정의 가능한 선원형 입력모듈, 그리고 사용자 편의성을 강화한 계산결과 시각화 모듈로 구성되어 있으며 모든 과정을 GUI(Graphical User Interface)로 구성하여 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 하였다 [12]. 개발된 코드의 계산체계 및 각 모듈에 대한 기능들은 다음과 같다.

그림 3-3-1에서는 GUI 기반 반도체 센서 설계코드의 계산체계를 나타내고 있다. MCNP input Generator에서는 입력된 반도체 센서의 물리적 특성과 방사선원의 특성을 이용하여 MCNP 인풋을 생성하며 설계코드에 저장되어 있는 MCNP input은 사용자 컴퓨터에 구축되어 있는 MCNP와 즉각 연결되어 계산결과를 도출할 수 있도록 하였다. 그리고 MCNP 계산으로부터 도출된 입사방사선의 반응지점과 부여에너지에 대한 정보만을 별도로 저장하여 각 위치별 전하포집효율을 반영, 최종적으로 입사방사선의 에너지스펙트럼이 확보될 수 있도록 하였다.

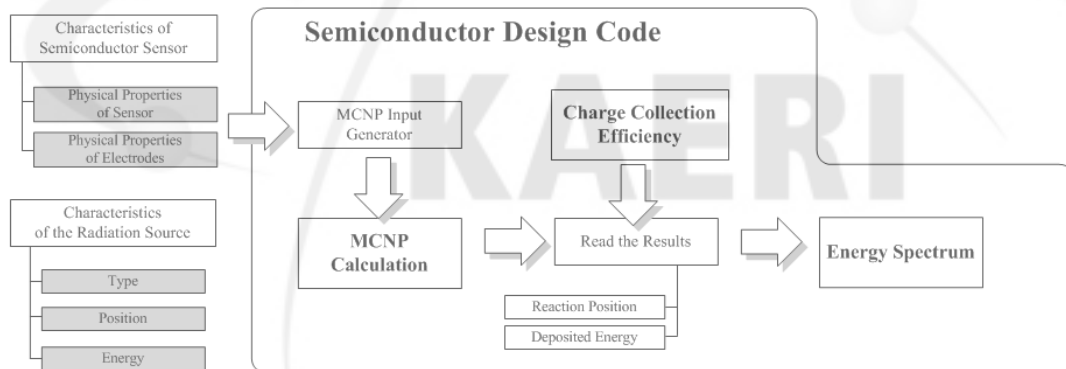


그림 3-3-1. 반도체 센서 설계코드의 계산체계

1. 몬테칼로 코드와 호환되는 Geometry 입력모듈

Geometry 입력모듈에서는 사용자가 설계하고자 하는 반도체 센서의 물리적인 특성들을 그림 3-3-2와 같이 쉽게 설정할 수 있도록 개발하였다. CdZnTe 센서를 구성하고 있는 원소별 정보, 센서의 밀도, 그리고 사이즈 등이 입력변수로 사용되었으며 전극(Cathode & Anode)의 변화에 따른 영향도 평가할 수 있도록 하였다. 설정 가능한 전극의 종류는 Graphite, Copper, Gold, Molybdenum, Palladium, Platinum, Silver, Tungsten

으로 CdZnTe 센서에 사용되는 모든 전극들이 모사될 수 있도록 하였다. 그리고 사용자가 입력한 변수가 정확하게 삽입되었는지를 확인할 수 있도록 Visualization 창을 별도로 설계하였으며 설계된 창에서는 Rotate 버튼을 이용하여 Geometry를 자세히 조사할 수 있도록 하였다.

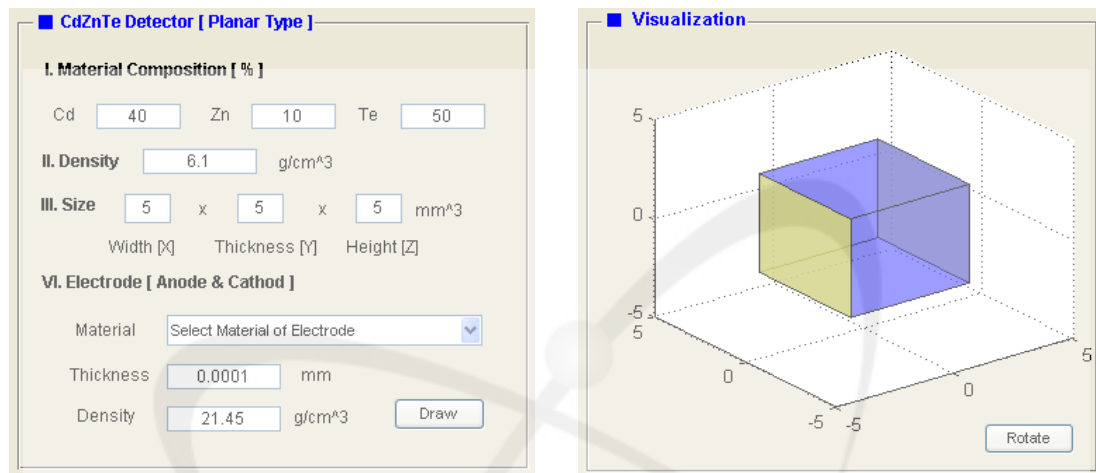


그림 3-3-2. Geometry 입력부와 Visualization창

2. 사용자가 정의가능한 선원형 입력모듈

선원형 입력모듈에서는 사용자가 정의하고자 하는 방사선원의 특성들을 그림 3-3-3과 같이 쉽게 설정할 수 있도록 개발하였다. 방사선의 종류, 센서로부터의 거리, 에너지와 발생분율 등이 입력변수로 사용되었으며 동시에 다양한 에너지의 방사선들이 모사될 수 있도록 하였다. 특히, 반도체 센서의 성능평가를 위한 방사선원은 일반적으로 동위원소들을 사용하기 때문에 방사선의 에너지 분포는 정의되지 않도록 하였으나 단일에너지의 선원들이 동시에 여러 개 모사될 수 있도록 하는 기능을 대신 삽입하였다. 또한 사용자가 정의한 방사선원이 정확하게 삽입되었는지를 확인할 수 있도록 반도체 센서의 Geometry와 함께 선원의 위치도 표시되도록 개발하였다.

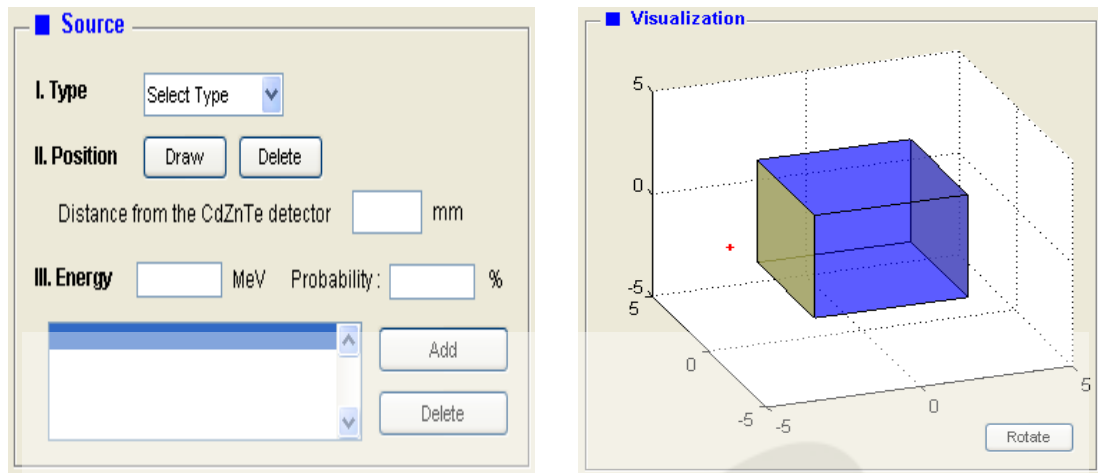


그림 3-3-3. 사용자가 정의가능한 선원형 입력모듈

3. 전하포집효율을 계산하기 위한 입력모듈

전하포집효율을 계산하기 위한 입력모듈에서는 사용자가 정의하고자하는 센서의 수송 특성을 그림 3-3-4와 같이 쉽게 설정할 수 있도록 개발하였다. 전하포집효율은 2장에서 정확성을 검증한 Hecht 모델이 적용되었으며 전자와 홀의 이동수명시간, 분석하고자하는 전기장 세기만을 입력하도록 하여 사용자의 부담을 최대한 줄일 수 있도록 하였다. 그리고 도출된 전하포집효율은 MCNPX 계산으로부터 확보된 방사선의 반응지점, 흡수에너지 정보와 결합되어 최종적인 에너지 스펙트럼을 도출하는데 사용된다.

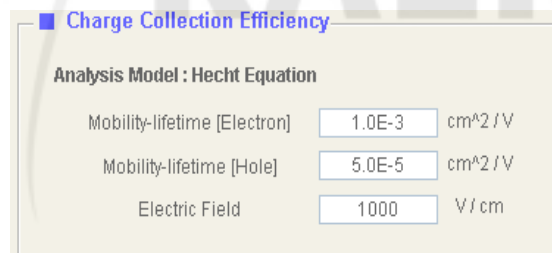


그림 3-3-4. 전하포집효율을 계산하기 위한 입력모듈

위에서 개발된 각 모듈들이 통합적으로 구성된 GUI 기반의 반도체 설계코드는 그림 3-3-5에 나타내었으며 좌측에는 MCNP 계산과 관련된 Geometry 입력모듈과 선원형 입력모듈을 배치하였고 우측에는 전하포집효율을 계산하기 위한 입력모듈과 Visualization 창을 배치하여 사용자가 편하게 사용할 수 있도록 하였다. 그림 3-3-6은 개발된 설계코드를 이용하여 Am^{241} 동위원소로부터 발생된 몇 가지 방사선들의 에너지스펙트럼을 계산한 그래프이다. 사용자의 추가적인 작업 없이 계산결과가 바로 도출될 수 있도록 하였으

며 선의 종류 및 색깔 등은 사용자의 개성에 따라 자유롭게 변화시킬 수 있도록 하였다.

본 연구에서 개발된 GUI 기반의 반도체 센서 설계코드는 국내최초로 개발을 완료하였으며 한국원자력연구원에서 개발 중인 CZT 계측기의 성능평가 및 개선작업에 중요한 역할을 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

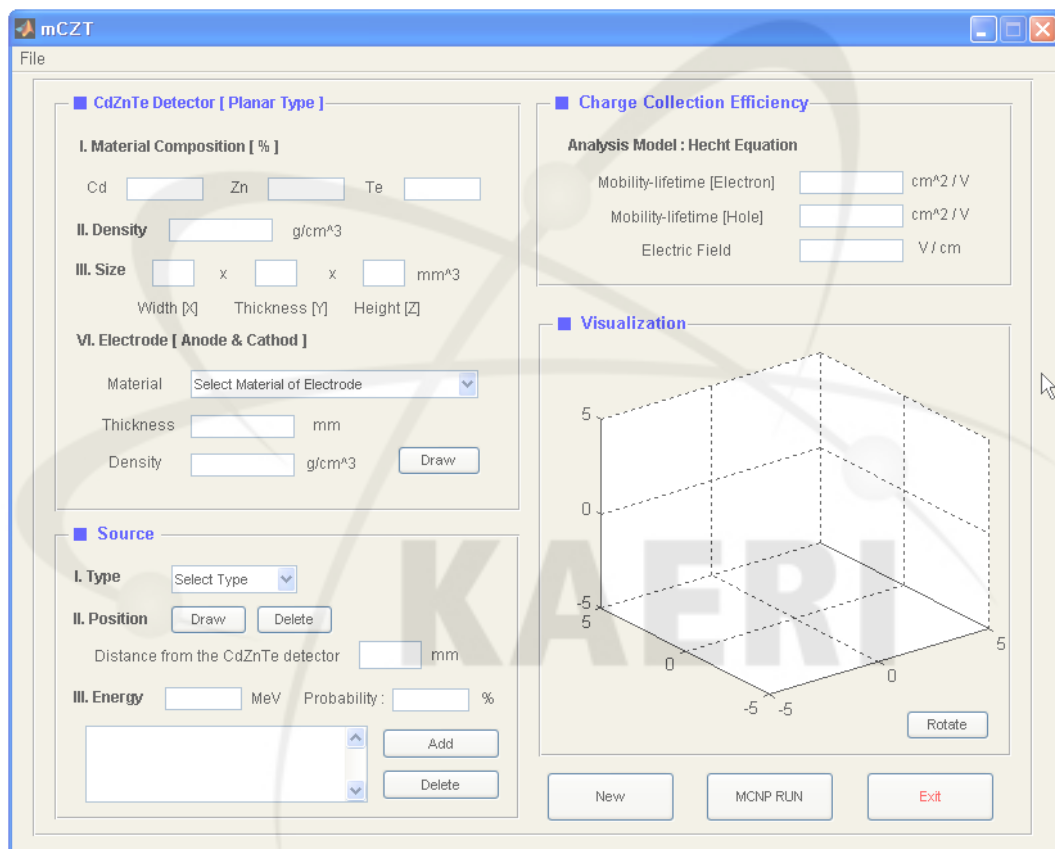


그림 3-3-5. GUI 기반의 반도체 센서 설계코드

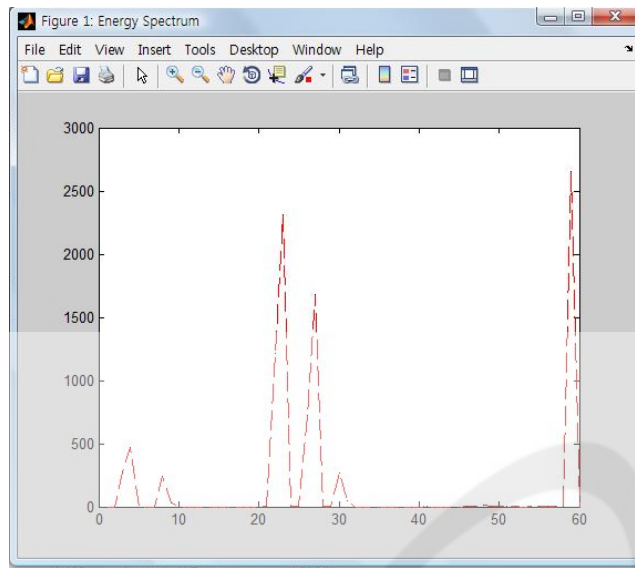


그림 3-3-6. GUI 기반의 반도체 센서 설계코드에서 도출된 에너지 스펙트럼

KAERI

제 4 절 반도체 센서 전극 및 박막 물리적 특성 평가

1. 이온주입 Wafer 분석 및 금속 박막 평가

이온 주입된 반도체 웨이퍼의 특성 평가를 위해 Auger Electron Spectroscopy(AES) 방법을 사용하였다. AES 방법을 통해서 Auger Spectra와 Depth Profiling을 구하여 주입된 이온의 농도 분포를 분석하였다.

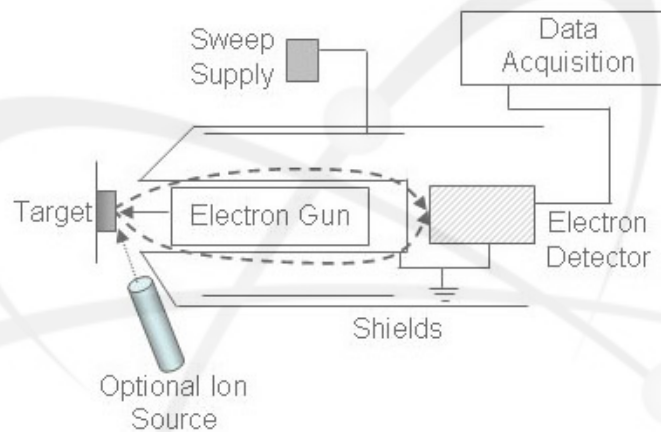


그림 3-4-1. Auger 검사 장비 모식도[13]

- Auger Spectra : 점 또는 면에 존재하는 원소의 정성, 정량분석 가능
 - 정성 분석 : 에너지별 전자 신호 강도를 측정하여 원소별 Auger 특성 Peak를 확인하여 원소의 종류를 알 수 있다.
 - 정량 분석 : 원소별로 Auger 특성 피크를 포함하는 에너지 범위를 설정하여 에너지별 개수를 측정하고 원소별 감도 인자(Element Sensitivity Factor)를 고려하여 원소별 조성비를 얻을 수 있다
- 수직분포분석(Depth Profiling)
 - 시료표면에 에너지가 큰 불활성기체로부터 발생시킨 양이온을 충돌시킴으로써 표면을 분당 수~수십 Å씩 깎아 내면서 수 천 Å까지의 깊이에 따른 조성 변화와 화학적 상태 변화를 분석하는 방법이다. 이온식각은 Ion Gun에 의해서 이루어지며, 보통 컴퓨터에 의해 자동적으로 이온 식각과 스펙트럼 측정을 순차적으로 진행시키면서 결과를 얻는다.

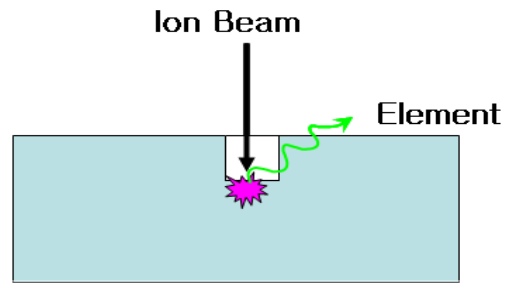


그림 3-4-2. Depth Profiling 모식도

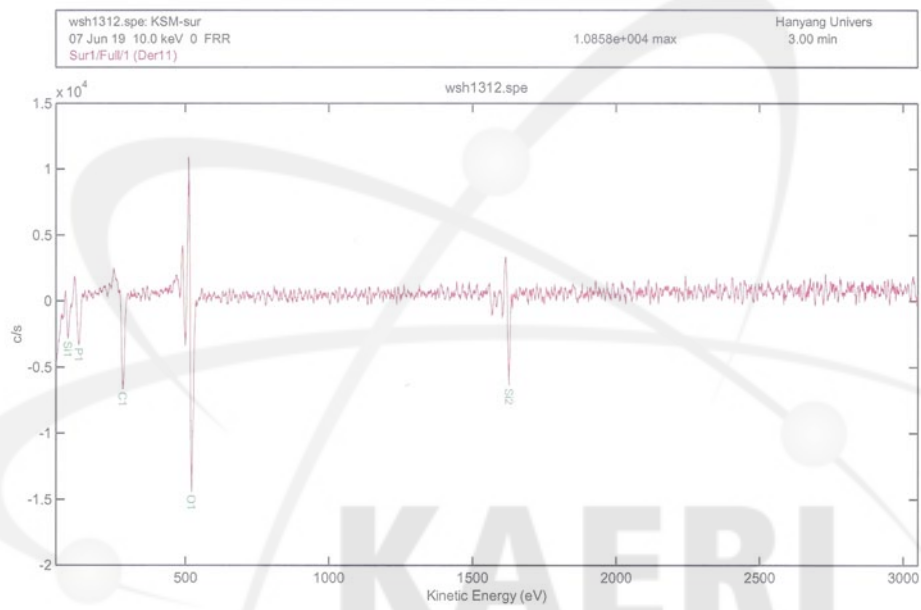


그림 3-4-3. Phosphorus가 C-face에 주입된 SiC 반도체에 대한 Auger Spectra

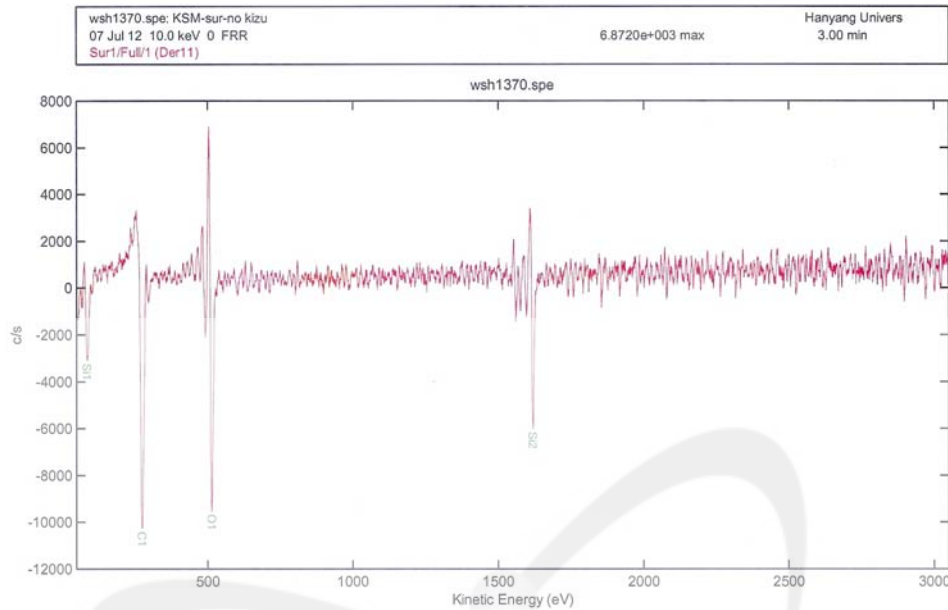


그림 3-4-4. Boron이 Si-face에 주입된 SiC 반도체에 대한 Auger Spectra

Semi-insulating 성질을 가진 6H-SiC의 C-face에는 Phosphorus를 주입하고, Si-face에는 Boron을 주입하여 PIN 구조를 형성하였다. 주입된 이온의 농도는 1018 개이다. 그림 3-4-3과 3-4-4는 Phosphorus와 Boron이 주입된 SiC 반도체 시편에 대한 Auger Spectra이다. Auger Spectra는 4 nm 깊이의 웨이퍼 표면 부근에서 이온빔에 의해 반응하여 발생하는 에너지를 모두 측정하여 그에 대응하는 원소로 나타내었다. Spectra 측정 결과 C-face에서 Phosphorus는 검출이 되었으나 Si-face에서 Boron이 검출되지 않았다. 이것은 Boron의 이온 주입이 거의 이루어지지 않은 것을 의미하며 반도체 검출기 내부에 PIN 구조 형성이 불안정함을 나타낸다.

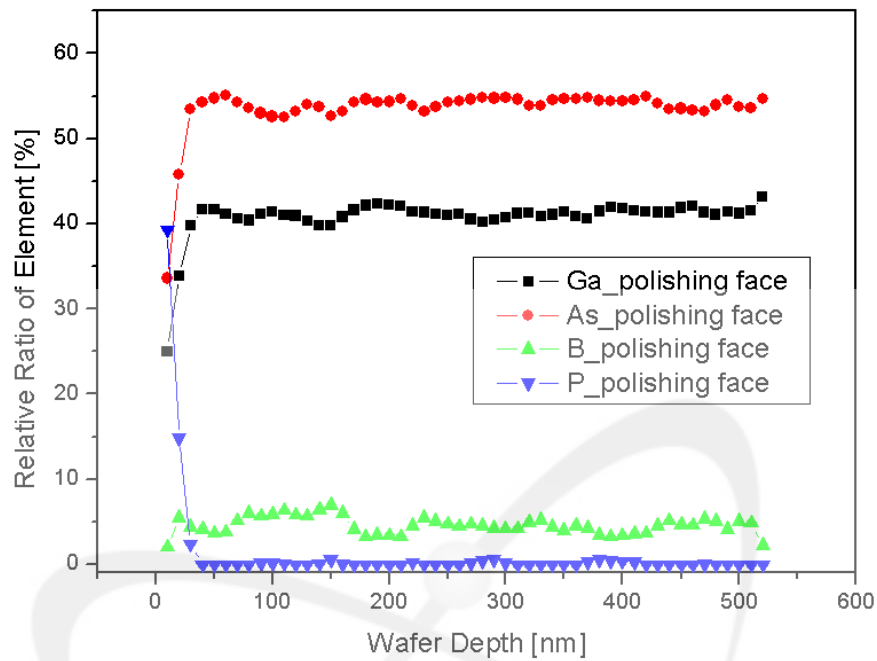


그림 3-4-5. Depth Profiling: GaAs 웨이퍼의 Polishing Face에 Phosphorus 주입

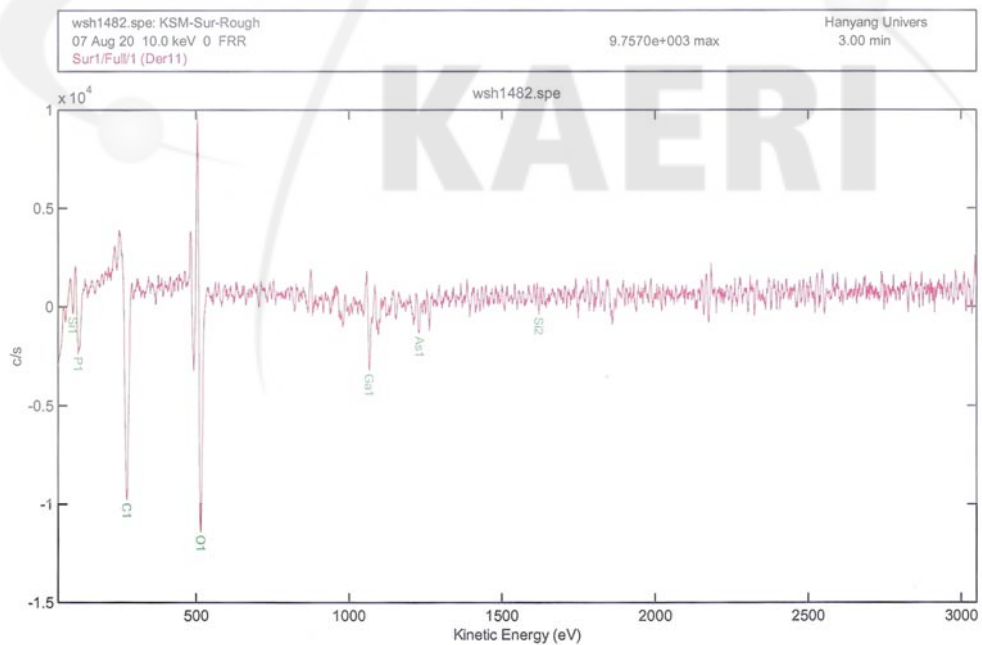


그림 3-4-6. Auger Spectra: GaAs 웨이퍼의 Polishing Face에 Phosphorus 주입

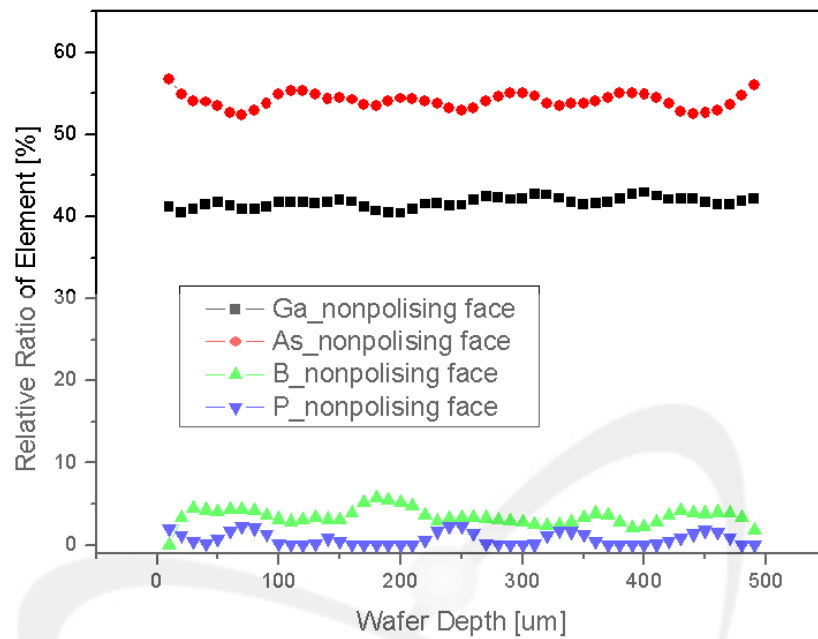


그림 3-4-7. Depth Profiling: GaAs의 Non-polishing Face에 Boron 주입

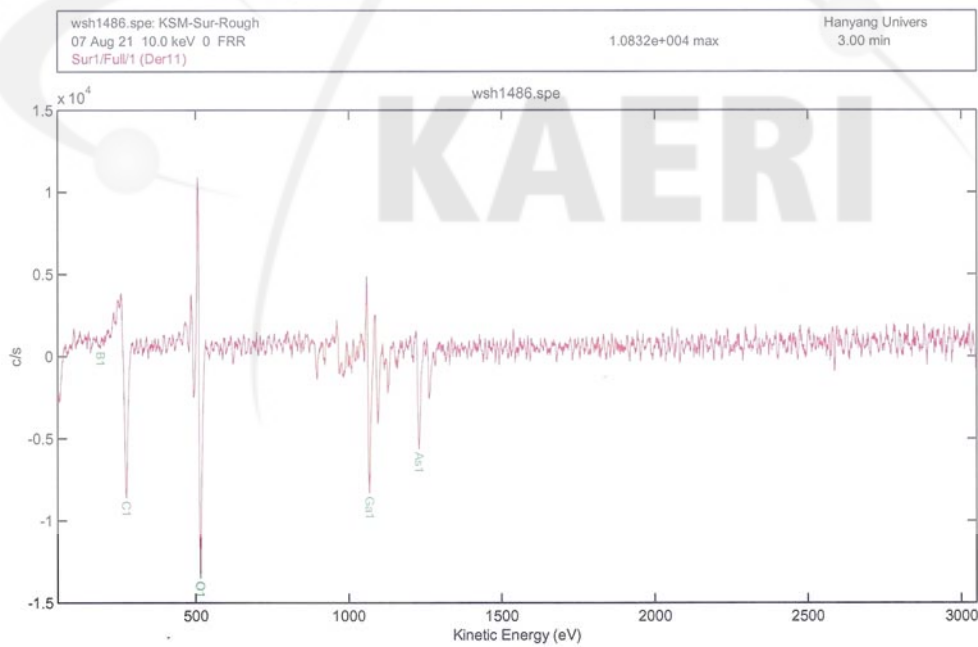


그림 3-4-8. Auger Spectra: GaAs의 Non-polishing Face에 Boron 주입

그림 3-4-5와 3-4-6은 GaAs 웨이퍼의 Polishing면에 대한 Depth Profiling과 Auger Spectra 결과이다. GaAs 웨이퍼의 경우 한쪽 면이 Polishing이 되어서 유리처럼 반사가 될 정도로 깨끗하지만 반대편은 Polishing 작업이 하지 않아서 불투명한 상태이다. 이러한 면의 Polishing 여부를 가지고 이온 주입된 원소의 종류 또는 주입 여부를 구분하였다. Depth Profiling은 10 nm 간격으로 500 nm 정도까지 측정하였다. AES 장비의 경우 측정하는 총 범위가 증가할 경우 이온빔에 의해 방출되는 원소들에 의해 장비 내부의 진동도 저하로 측정의 정밀도가 감소하는 측정상의 제약이 존재한다. 그래서 일반적으로 400~500 nm 깊이를 측정 범위로 설정하여 검사를 실시한다. 그림 3-4-5의 Depth Profiling 원소별 상대적 비율을 보면 웨이퍼의 표면에서 Phosphorus의 함량이 높다가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Phosphorus 주입 깊이가 표면에 국한되어 있다는 것을 의미하며 50 nm 이하이기 때문에 검출기 제작시 불안정한 동작의 원인으로 작용할 수 있다. 웨이퍼 표면에서의 원소 성분을 보여주는 Auger Spectra 측정 결과를 보면 Phosphorus가 존재하는 것을 재확인할 수 있고, 웨이퍼가 공기 중에 노출 될 경우 생기는 Natural SiO₂에 의해 산소가 존재하는 결과를 나타냈었지만 Depth Profiling 그래프에서 검출되지 않는 것으로 보아 형성된 두께가 매우 얇기 때문에 검출기 동작에 큰 영향이 미치지 않을 것으로 분석된다. 그림 3-4-7과 3-4-8은 Polishing 되지 않은 불투명면에 대한 Depth Profiling과 Auger Spectra 결과이다. Boron에 주입되었으나 AES 측정 결과에서는 웨이퍼 내부에 Boron 주입 효과가 나타나지 않고 있다. 주된 구성 원소는 Ga, As이며 표면에서는 Polishing 면과 동일하게 SiO₂에 의한 산소가 검출되는 결과를 나타내고 있다. 결국 Boron이 GaAs 웨이퍼 내부에 주입되지 않았기 때문에 PIN 구조가 형성되지 않았음을 알 수 있다.

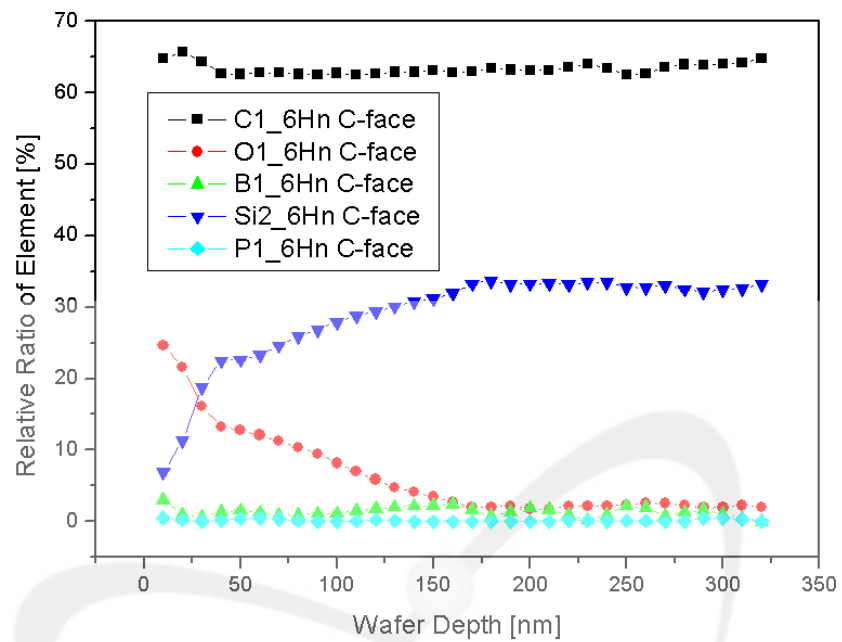


그림 3-4-9. Depth Profiling: n-type 6H-SiC C Face, 이온 주입하지 않음

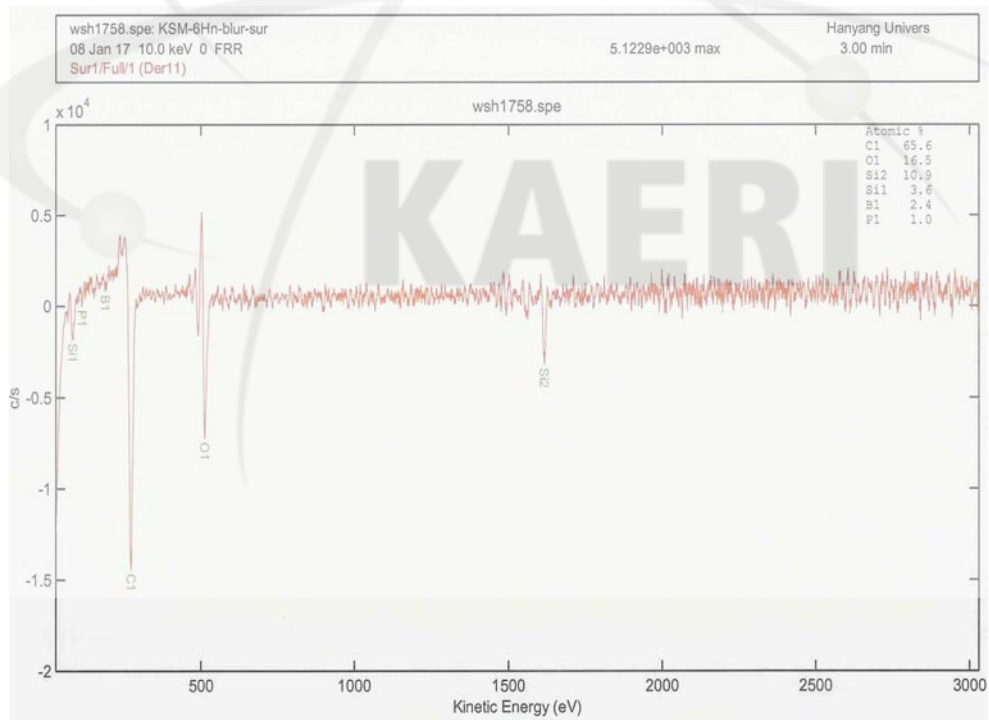


그림 3-4-10. Auger Profiling: n-type 6H-SiC C Face, 이온 주입하지 않음

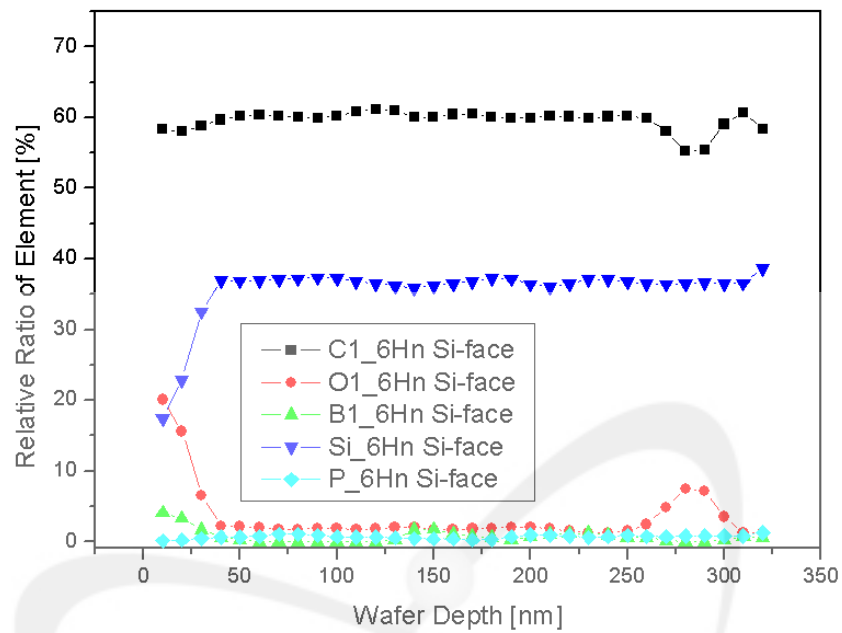


그림 3-4-11. Depth Profiling: n-type 6H-SiC Si Face, Boron 주입

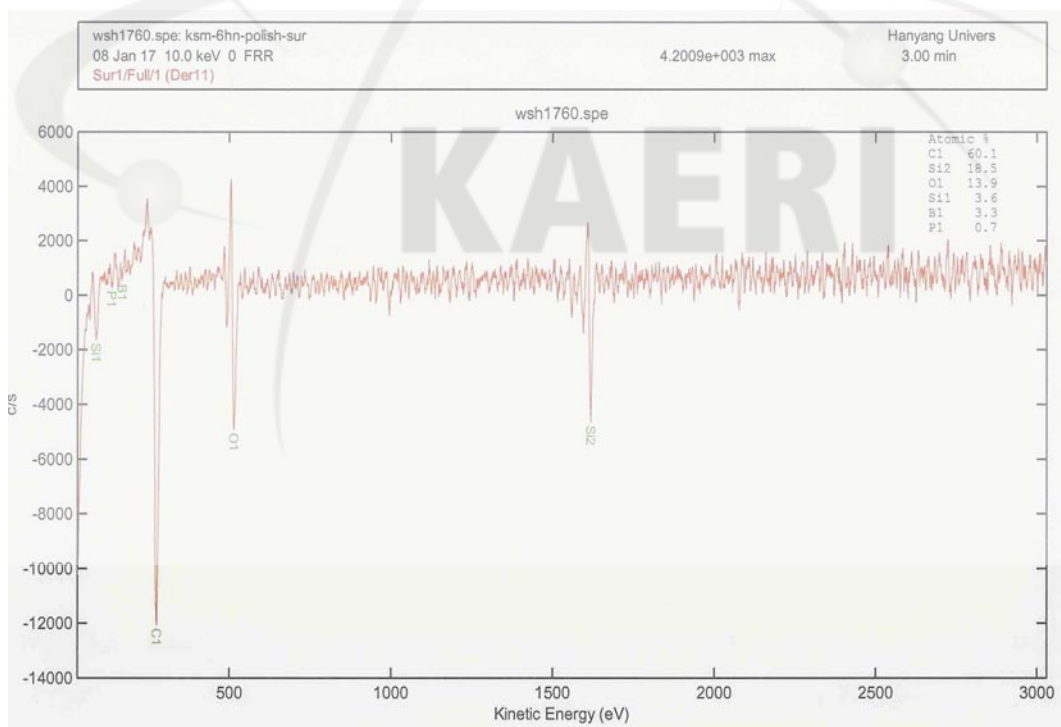


그림 3-4-12. Auger Profiling: n-type 6H-SiC Si Face, Boron 주입

n-type SiC 반도체 웨이퍼의 경우는 GaAs 웨이퍼와 유사하게 불투명한 면과 그렇지 않은 면을 통해 이온 주입의 종류 또는 주입 여부를 구분할 수 있다. n-type 6H-SiC 웨이퍼의 경우 불순물이 혼합되어 있는 형태이기 때문에 외형적으로 옅은 녹색을 띄고 있고 불투명한 면이 C-face이고 Polishing 작업이 이루어져 거울처럼 반사되는 면이 Si-face로 설정되어 있다. 그림 3-4-9와 3-4-10은 C-face에 대한 AES 측정 결과이고 그림 3-4-11과 3-4-12는 Si-face에 대한 결과이다. 그림 3-4-11의 Depth Profiling 측정 결과를 보면 P와 B 원소가 동시에 검출이 된 것으로 나타나지만 Depth 깊이가 관계없이 매우 낮은 함유량을 보이고 있다. 이것은 반도체 성질을 위해 초기에 주입된 불순물에 의한 결과인 것으로 분석된다. SiC 웨이퍼의 표면을 한쪽은 C-face, 다른 한쪽은 Si-face라고 하는 것은 Si와 C의 결합 구조 특성상 한쪽이 Si로 이루어지면 반대편 마지막 원자층은 C로 구성된 표면으로 끝나기 때문이다. Depth Profiling 결과 보면 이러한 표면이 구분되는 특성을 잘 보여주고 있다. C 원자가 전체 구성 요소의 70% 정도를 차지하고 있는 것을 측정 결과를 통해 확인할 수 있다. Depth에 따른 원소 측정 결과에서 또 하나 주목할 것을 O의 함유량이다. GaAs 웨이퍼와 달리 O 함유량이 150 nm 깊이에서도 측정됨을 알 수 있다. 이러한 O가 존재하는 깊이를 통해 공기 중에 웨이퍼가 노출되어서 만들어지는 Natural SiO₂ 층의 두께를 역으로 가늠할 수 있다. Depth Profiling 결과에서 보면 150 nm 정도의 두께를 나타내고 있는데 이것은 전극형성을 위해 증착되는 Au 박막의 두께와 유사하기 때문에 세정 공정을 통해 제거해야만 제작된 검출기가 보다 안정적으로 동작할 것이다. 그림 3-4-9와 3-4-10은 Boron이 주입된 Si-face에 대한 Depth Profiling과 Auger Spectra이다. 그림 3-4-7과 달리 C의 함유량이 10%정도 감소하였고 반면 Si 원소가 40%정도 수준에서 일정하게 측정되고 있다. 이것은 SiC 웨이퍼가 가지고 있는 Si-face 결정 구조 특성 때문에 나타나는 결과이다. Boron 주입으로 웨이퍼 표면 근처에서 Phosphorus에 비해 함유량이 5배 정도 상승하였지만 전체적이 양이 작기 때문에 도핑 효과에 의한 새로운 Layer 형성은 어려울 것으로 판단된다. Depth 결과 그래프의 깊이가 300 nm 부근에서 O 함유량이 일시적으로 상승하는데 이것을 이온빔에 의해 생성된 원소들에 의해 장비 내부의 진공도가 영향을 받았기 때문으로 분석된다.

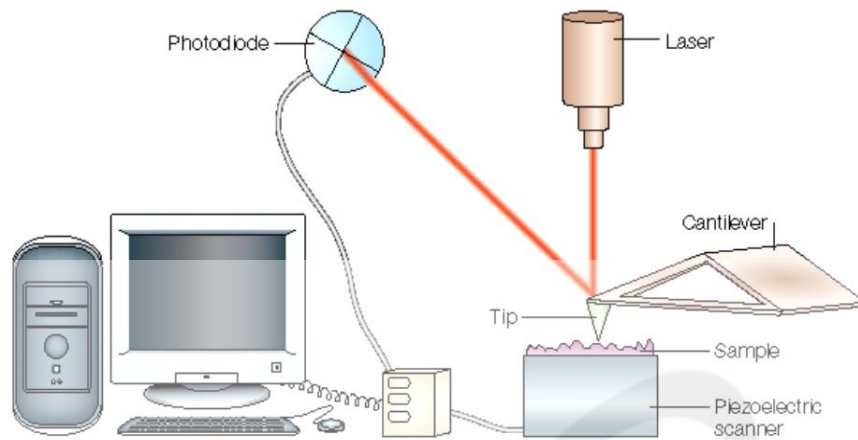


그림 3-4-13. AFM(Atomic Force Microscope) 시스템 구성 요소[14]

AFM은 탐침을 시료 표면에 근접시켰을 때 생기는 원자 사이의 힘을 이용하여 시료 표면의 형태를 관찰하는 표면 분석 장치이다. AFM에서 사용되는 탐침은 캔틸레버라 불리는 작은 막대 끝에 달려있다. 마이크로머시닝으로 제작된 캔틸레버는 그림1에서 보는 것과 같이 길이 $100\ \mu\text{m}$, 폭 $10\ \mu\text{m}$, 두께 $1\ \mu\text{m}$ 정도로 아주 작아서 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 캔틸레버 끝 부분에 달려 있는 탐침의 끝은 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료 표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기는 힘(인력)이나 밀치는 힘(척력)이 작용한다(Van der Waals Force). 여기서 인력을 이용하는 방식은 비접촉식(Non-contact Mode) AFM이고, 척력을 이용하는 것은 접촉식(Contact Mode) AFM이다. 접촉식 AFM에서 척력을 사용하는데 그 힘의 크기는 $1\sim 10\ \text{nN}$ 정도로 아주 미세하지만 캔틸레버 역시 아주 민감하므로 그 힘에 의해 휘어지게 된다. 이 캔틸레버가 아래위로 휘는 것을 측정하기 위하여 레이저 광선을 캔틸레버에 비추고 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 포토다이오드(Photodiode)를 사용하여 측정한다(그림 3-4-14). 이렇게 하면 바늘 끝이 $0.01\ \text{nm}$ 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해낼 수 있다. 구동기의 높이를 조절하여 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면 탐침 끝과 시료사이의 간격도 일정해지므로 STM의 경우에서와 같이 시료의 형상을 측정해낼 수 있다.

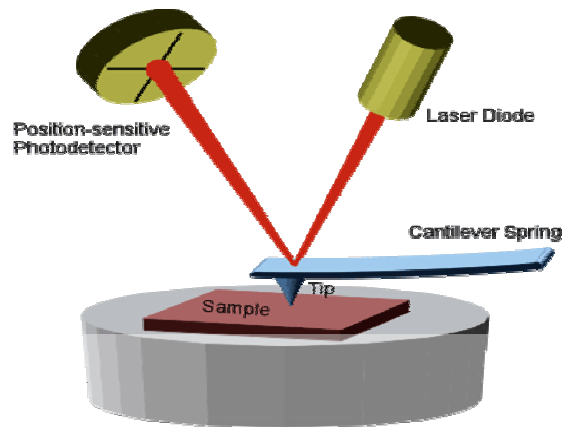


그림 3-4-14. 캔틸레버에 의한 표면 측정 방법 모식도[15]

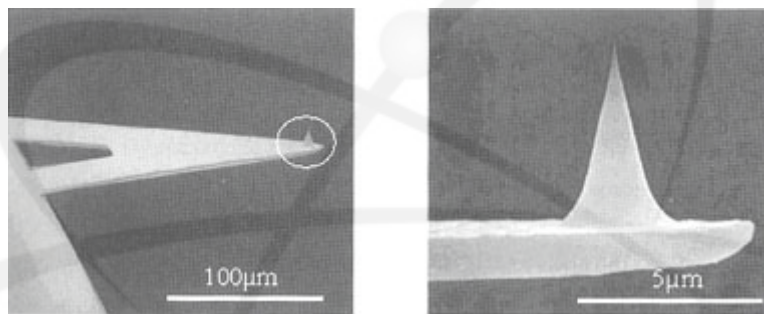


그림 3-4-15. 캔틸레버에 대한 SEM 사진

SiC 반도체 검출기는 고온 환경에서도 우수한 방사선 반응을 보이는 것으로 알려져 있다. Au/Ni이 증착된 SiC 시편을 300℃ 환경에 노출시켰을 때 증착된 금속 박막에 어떠한 영향이 있는지를 알아보기 위하여 열처리 전후의 표면을 AFM으로 촬영하였다. 촬영에 사용된 시편은 고온급속열처리 장치에서 300℃, 10분 동안 열처리 된 SiC 시편이며 AFM 스캔 사이즈는 1 μm이다. 그림 3-4-16은 열처리 전후의 SiC 금속박막의 표면을 촬영한 영상이다. 열처리 공정의 영향으로 표면의 Roughness가 1/2로 감소되었다.

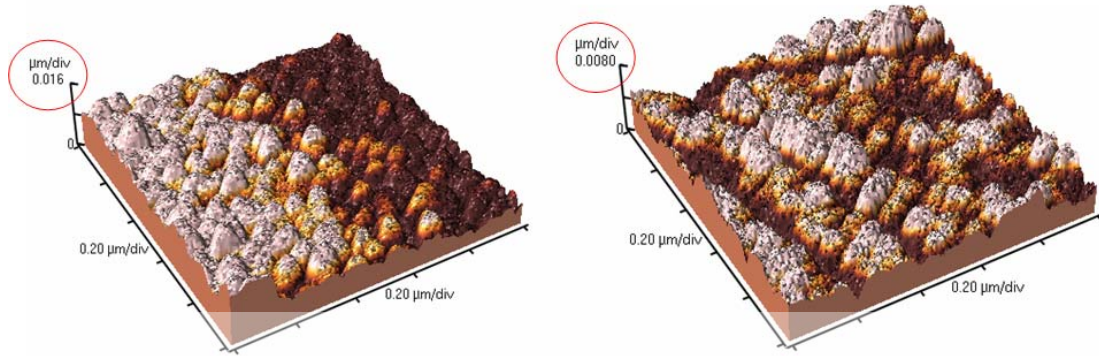


그림 3-4-16. 열처리 전후의 SiC 표면 AFM 사진
(왼쪽 : 열처리 전, 오른쪽 : 열처리 후)

반도체 검출기 제작 공정은 사용하는 웨이퍼의 종류를 달리할 뿐 유사한 과정을 통해 제작이 이루어지고 있다. 반도체 웨이퍼 중 가장 대중적으로 사용되는 Si 반도체를 이용하여 SSB 검출기를 제작할 수 있다. 이 때 사용되는 Si 반도체에를 이용한 검출기 제작 공정 중 세척 공정을 달리하였을 경우 Si 웨이퍼 표면은 그림 3-4-17과 같이 Roughness에 확연한 차이가 생긴다. AFM 촬영 사이즈는 1 μm 이다. 측정된 AFM 사진을 통해 Roughness 계산은 그림 3-5-42와 같은 3D 영상이 아닌 2D 이미지를 사용한다. 촬영된 이미지의 전체 표면에서 고르게 Roughness 값을 획득하기 위하여 그림 3-4-18과 같이 가로 영역에서 5개 라인, 세로 영역에서 5개 라인을 임의로 설정하고 그 때 측정된 10 point의 Roughness 값을 통해 평균과 표준편차를 구하여 세척 조건에 따른 영향을 분석하였다. 이와 같은 측정 방법은 열처리 전후의 시편 Roughness를 구할 때도 사용되었다.

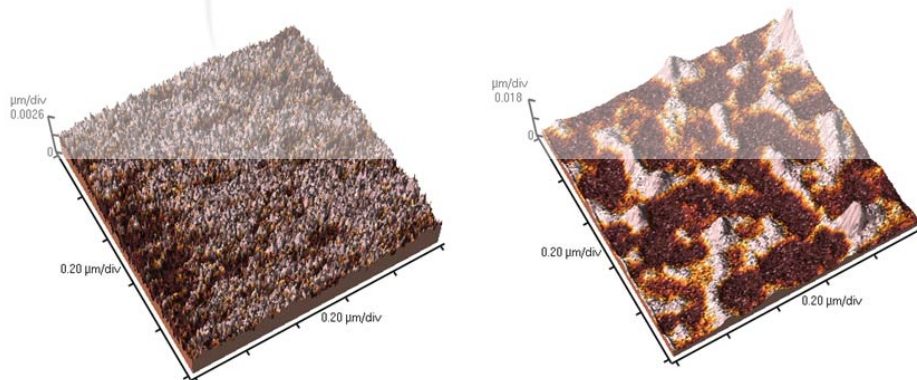


그림 3-4-17. 세척 공정 변화에 따른 Si 웨이퍼 표면 Roughness 변화

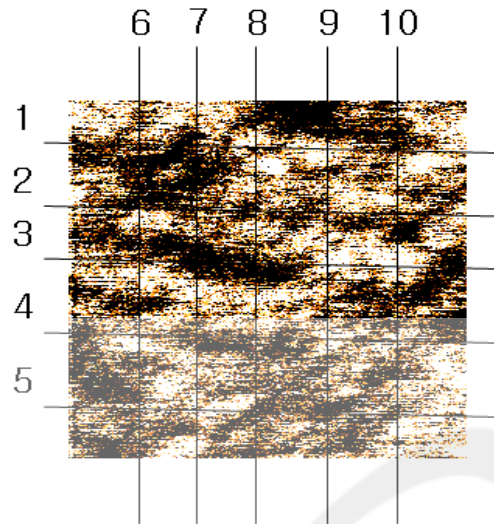


그림 3-4-18. 2D AFM 영상을 통한 Roughness 계산

세척 공정 변화에 따른 효과를 보기 위하여 3가지 공정을 설정하고 각 공정에 사용된 6H-SiC 시편을 각각 Sample A, B, C라고 명명하였다. Sample A에 사용된 세척 공정은 대부분의 반도체 공정에서 채택하여 사용하고 있는 RCA 공정이다. 이것은 1차적으로 아세톤을 통해 표면 유기물을 제거하고 2차 표준 세척 공정을 통해 Particle, Heavy Organic, Metal Impurities를 제거한 후에 희석된 HF로 Natural Oxide Film을 제거하고 마무리는 DI Water로 한다. Sample B는 Natural Oxide Film 제거만을 위해 희석된 HF와 DI Water를 사용하였다. 마지막 Sample C는 표면 유기물만을 제거하는 아세톤과 DI Water만을 사용하였다. 각 세척 공정에 따른 전후 시편 표면을 그림 3-4-19, 3-4-20, 3-4-21과 같이 AFM 영상으로 촬영하였다. 촬영 영상의 크기는 가로 세로 1 μm 이다.

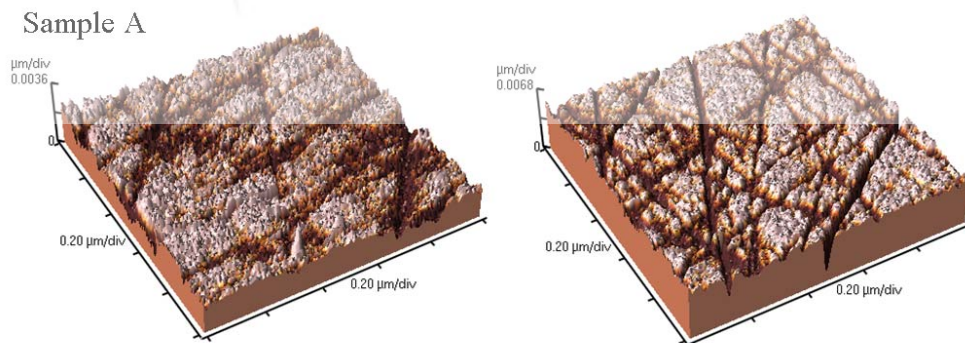


그림 3-4-19. RCA 세척 공정을 사용한 Sample A AFM 영상

Sample B

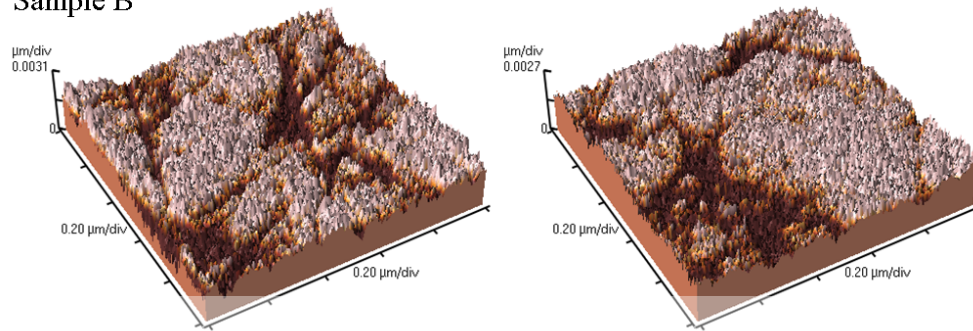


그림 3-4-20. 희석된 HF 세척 공정을 사용한 Sample B AFM 영상

Sample C

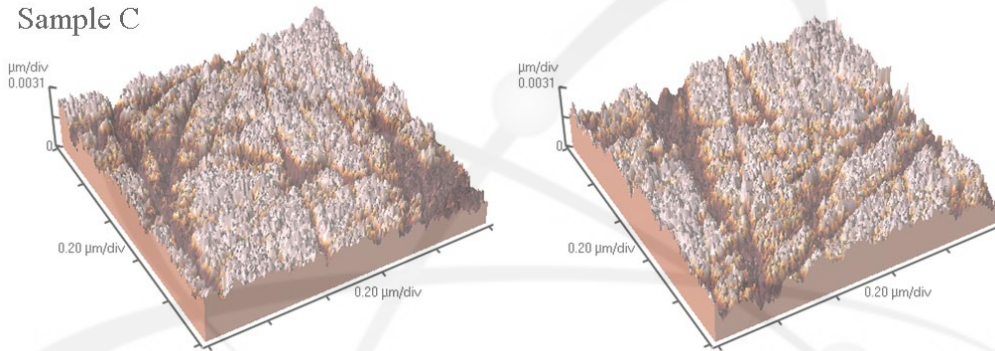


그림 3-4-21. 아세톤 세척 공정을 사용한 Sample C AFM 영상

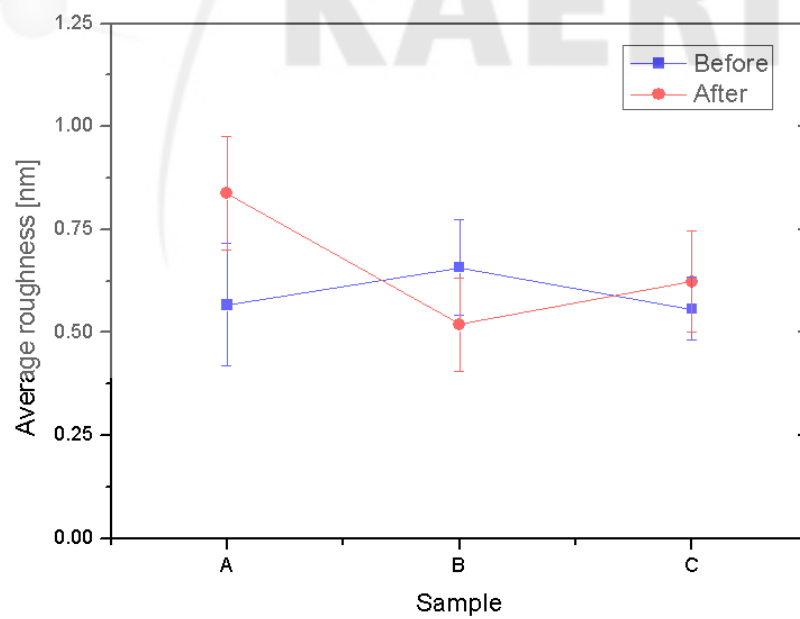


그림 3-4-22. 세척 공정 전후의 Sample A, B, C Roughness

세척 공정을 달리한 Sample A, B, C에 대한 roughness 계산은 그림 3-4-22와 같다. Roughness 계산은 Si 시편 분석과 동일하게 가로 방향에서 5 point, 세로 방향에서 5 point를 획득하여 평균값과 표준편차를 구하였다. 세척 공정 후 sample A, C의 경우에는 Roughness가 개선되었으나, 희석된 HF 만을 사용하였을 때는 Roughness가 상대적으로 더 거칠어졌다. HF는 Natural Oxide Layer만을 제거하기 때문에 표면에 남아 있는 이온이나 금속불순물 등의 잔여물로 인하여 이러한 결과가 나타난 것으로 분석된다.

2. 방사선 조사 후 반도체 검출기 평가

감마선 피로도는 ^{60}Co 대단위 감마선 조사시설을 이용하였다. 사용된 감마선 Dose는 4×10^6 과 1.2×10^7 rad-Si/h에서 시험 조사하였다. 평가 방법은 감마선 조사시험 전후의 전기적 I-V 특성변화를 측정하였다. 측정결과 감마선에 의한 재료의 물리적 특성변화는 미비하여 감마선에 내구성이 우수한 것으로 평가되었다. 분광학적 특성은 조사 전 후의 I-V 전기적 특성과 알파선반응성을 평가하였다. 제작된 센서의 ^{238}Pu , 5.5 MeV에 대한 분해능을 평가하였다. 광특성 평가 결과 감마선 조사 후 측정된 흡수스펙트럼 결과에서는 특이한 차이점을 발견할 수 없었으며, 반도체의 에너지 간격에는 변화가 없으며 새롭게 생성되거나 소멸된 에너지 준위가 생성되지 않았다.



그림 3-4-23. ^{60}Co 대단위 감마선 조사시설



그림 3-4-24. 감마선 조사 후 시편 보관유리병

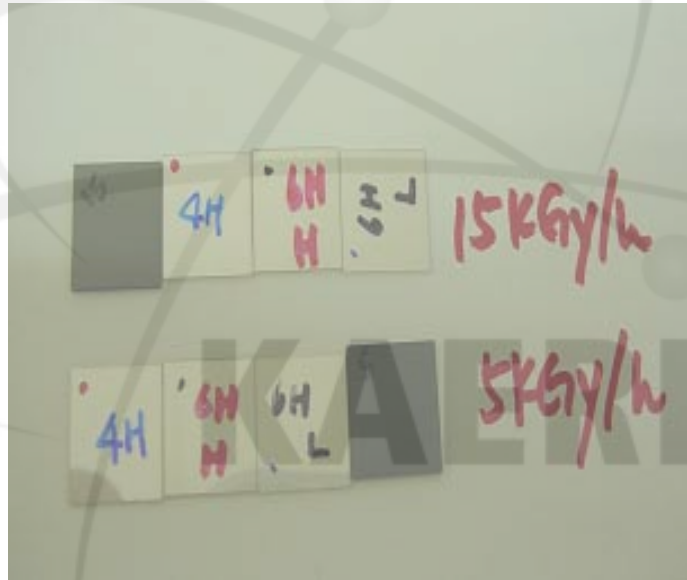


그림 3-4-25. 감마선 조사 후 SiC 반도체 시편

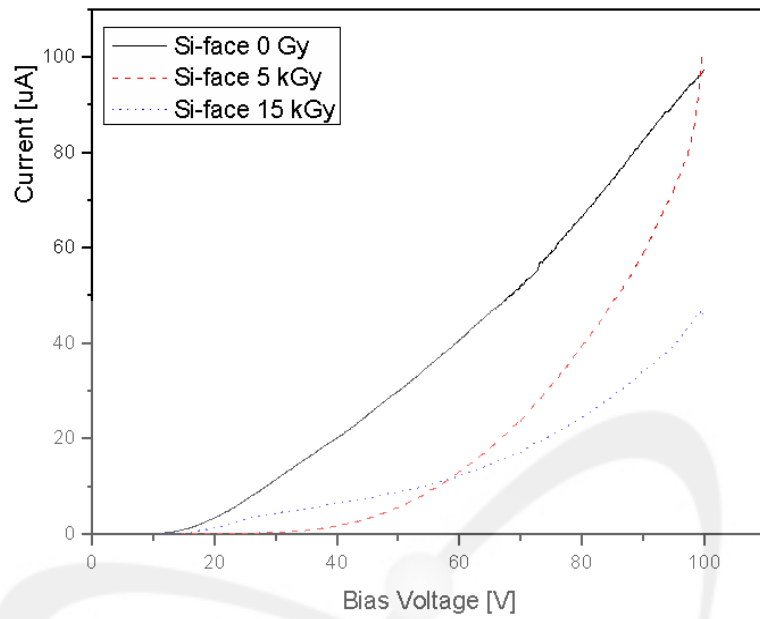


그림 3-4-26. 감마선 조사 후 SiC 시편에 대한 전류-전압특성곡선(Si-face)

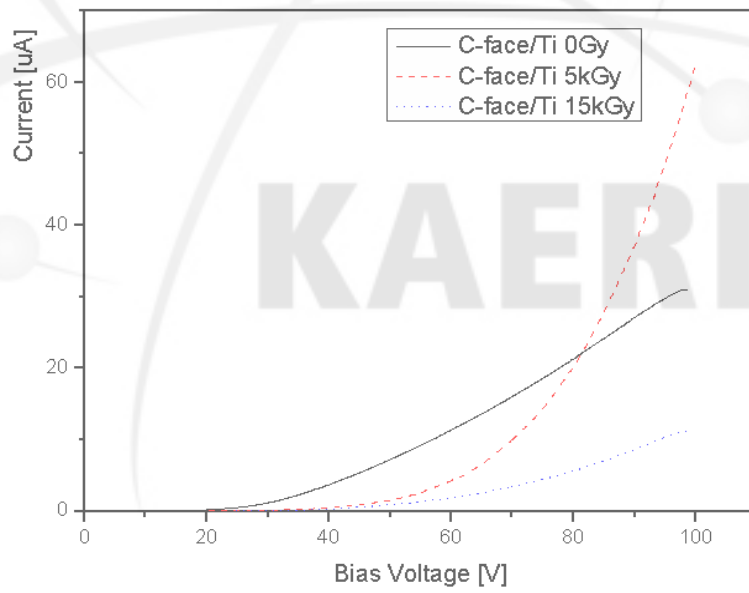


그림 3-4-27. 감마선 조사 후 SiC 시편에 대한 전류-전압특성곡선(C-face)

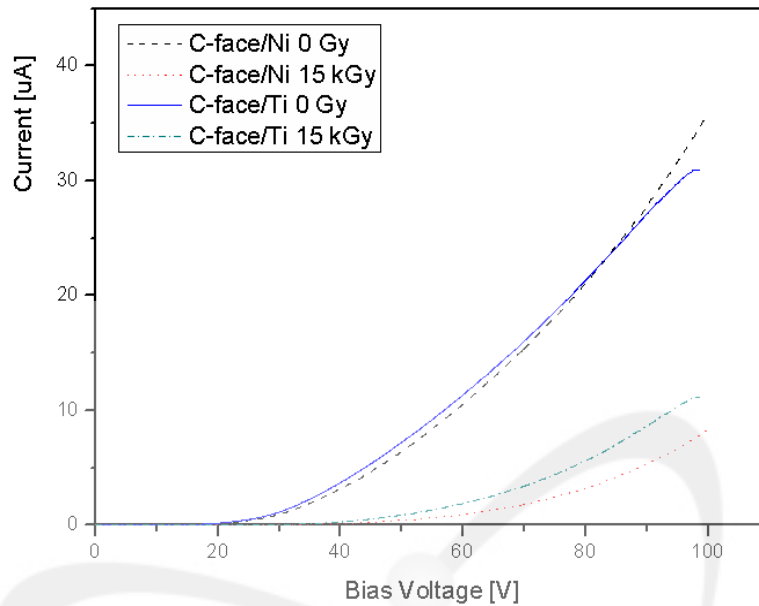


그림 3-4-28. 감마선 조사조건에 따른 SiC 시편의 전류-전압특성곡선(C-face)

감마선에 의해 조사된 SiC 시편에 대한 전류-전압특성곡선을 각각 측정하였다. 측정된 특성곡선은 Si-face와 C-face를 기준으로 비교하였다. 감마선이 조사되지 않은 시편의 전류값이 가장 크며 총 120 kGy가 조사된 시편의 Leakage Current가 가장 작은 수치를 나타내었다. 방사선 Damage의 경우 일반적으로 2가지로 구분된다. 첫 번째의 경우에는 반도체 검출기 제작에 사용되는 물질 자체의 손상이고 두 번째는 검출기 제작을 위해서 형성된 금속전극이 방사선 조사에 의해 손상이 발생하여 금속 전극면과 반도체물질 사이에 이상이 생기는 경우이다. 본 실험은 SiC 시편에 감마선을 조사하고 검출기를 제작하였기 때문에 손상이 발생하였다면 첫 번째 경우에 의해서이다. 감마선 조사가 가장 많이 된 시편의 전류의 값이 가장 작게 측정된 것은 감마선에 의해 SiC 내부 격자 구조에 이상이 발생하여 전자의 흐름이 방해되었기 때문으로 분석된다.

감마선 조사된 시편에 대한 전류-전압특성곡선의 또다른 결과는 C-face에 증착된 금속 물질이 Ni과 Ti 일 경우에 대한 비교이다. 일반적으로 SiC 기반의 반도체 센서를 제작 공정에서는 Si-face에 Ni을 C-face에 Ti를 수백 nm 수준으로 증착한 후에 Au 전극을 증착한다. 감마선에 의해 조사된 시편에 대한 전류-전압특성곡선 측정 결과는 Ni과 Ti의 사용이 조사되지 않은 시편이나 조사된 시편에서 크게 차이가 나지 않음을 보여준다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 금속전극 공정에 Ni/Au 구조만을 사용하였고 이것은 공정 시간의 단축효과의 장점으로 작용하였다. 감마조사에 대한 보다 정밀한 분석을 위하여 6H-SiC에 대한 Schottky Barrier Heights(SBHs)를 측정하였다. 계산을 위해 사용된 수식은 아래와 같다.

$$J = J_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1), \quad J_s \equiv A^{**} T^2 e^{-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}}$$

여기서

$$A^{**} \equiv \frac{f_p f_Q A^*}{1 + f_p f_Q \frac{v_R}{v_D}}$$

이며,

$$F_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(A^{**} \frac{T^2}{J_s}\right)$$

아래와 같은 결과가 기준에 발표되었다.[16]

$$A = 3.14 \times (0.3)^2 \text{ cm}^2 = 0.2826 \text{ cm}^2$$

$$A^* = A^{**} = 194A / \text{cm}^2 \text{ K}^2$$

SBH 계산 결과 감마선이 조사되지 않은 시편은 1.06 eV, 총 조사량이 40 kGy과 120 kGy인 시편은 각각 1.11 eV, 1.13 eV를 나타내었다. 세 가지 시편에 대한 SBH 값은 미세한 차이만을 나타내었고 이것은 15 kGy/hour 조건에서 8시간 동안 감마선에 노출되어도 SiC 반도체의 경우는 방사선 영향을 크게 받지 않기 때문에 안정적으로 동작할 수 있음을 보여주는 결과이다.

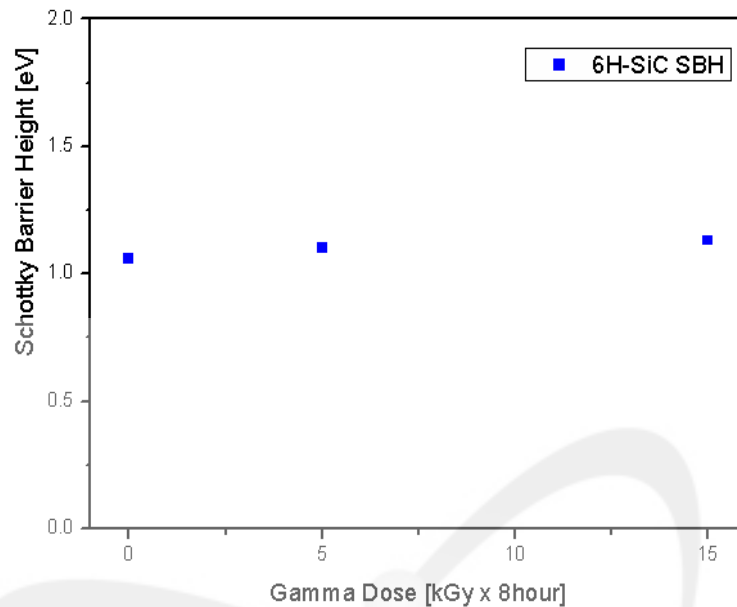


그림 3-4-29. 감마선 조사 후 6H-SiC 시편의 SBH

3. 온도에 따른 반도체 검출기 특성 측정 및 평가

알루미나 기반에 에폭시로 고정된 SiC 검출기 시제품에 대한 열처리 효과를 알아보기 위한 실험을 시도하였다. 실험에 사용된 검출기는 SiC Wafer의 고유저항에 따라 SiC-00, SiC-05, SiC-10으로 구분하였다. 실험에 사용된 검출기는 동일한 공정 조건에서 제작하였고, 알루미나 기판에 전도성 에폭시로 고정하였고, Anode 전극 형성을 위하여 Wire를 Anode 단자에 납땜으로 연결하였다. 이와 같은 동일 조건으로 제작된 3종류의 검출기는 급속열처리장비(RTA)에서 300℃, 30분 환경에 노출되었다. 온도 상승은 100℃ 단위로 순차적으로 증가시켰으며 각 단계에서 5분씩 대기 시간을 두어 SiC 검출기 주변의 온도가 고르게 분포하도록 하였다. 열처리 이후 온도 하강시에도 50℃ 단위로 나누어서 단계적으로 내렸으며 각 단계마다 3분 정도씩 대기 시간을 두었다. 이와 같은 조건을 사용한 것은 열처리 실험의 목적이 고온 환경에 노출된 SiC 검출기의 변화를 보기 위한 것이기 때문에 급격한 온도 변화에서 올 수 있는 검출기 영향을 최소화하기 위한 조치였다.

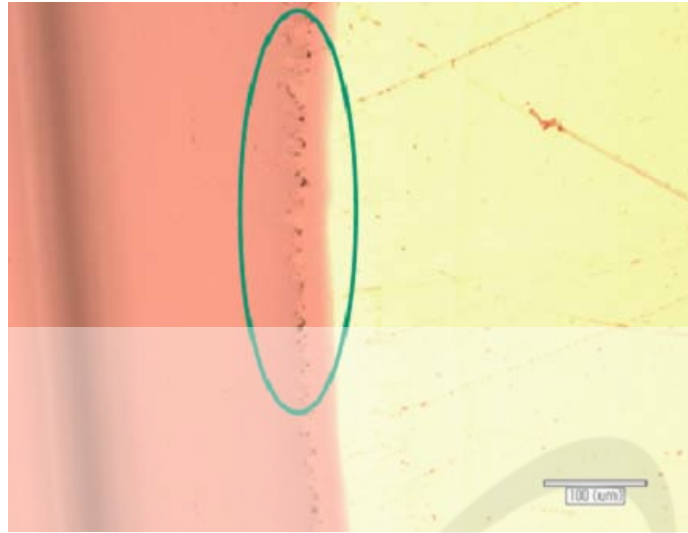


그림 3-4-30. 열처리 전 Au 박막 경계면 사진



그림 3-4-31. 열처리 후 Au 박막 경계면 사진

반도체 검출기 전극으로 사용되고 있는 Au의 경우 열처리 이후에 경계면의 증착 상태는 향상되었으나, 표면에서 Bubble이 생성되는 것이 관찰되었다. 일반적으로 전극의 박리 현상이 발생하여 웨이퍼 표면으로부터 떨어질 경우 노이즈 발생 요인 및 신호 수집효율이 떨어지는 현상이 나타날 수 있다. 열처리 통해 웨이퍼 계면과 금속전극 사이의 접촉성이 향상되는 것은 안정적인 신호 수집 전극을 형성하는데 일정 온도의 열처리가 효과를 줄 수 있음을 나타낸다.

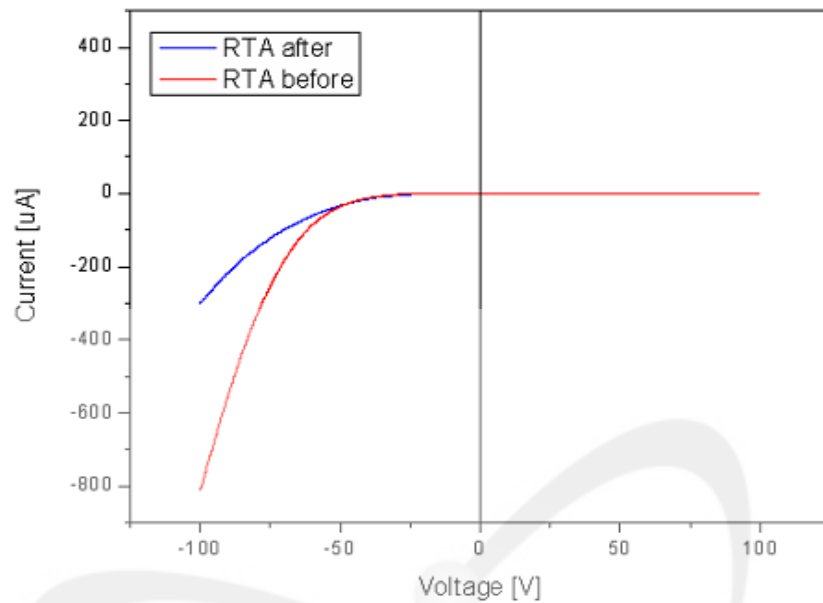


그림 3-4-32. 열처리 전후의 전류-전압특성 곡선

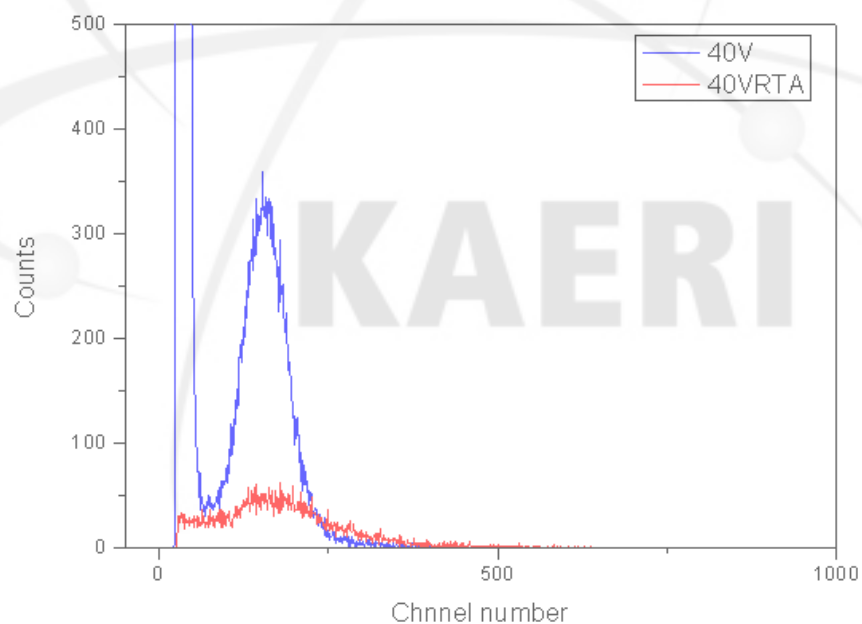


그림 3-4-33. 열처리 전후의 방사선 반응(^{238}Pu 알파선원)

300℃, 30분 처리 후 알루미나 기판 및 SiC반도체 센서는 외형적으로 크게 변화가 없었으나 전극 고정용 납땜의 경우 산화, 전도성 엑포시의 경우 접촉면 일부가 변색되는 현상이 관찰되었다. 알루미나 기판과 전도성 엑포시만을 사용할 경우 300℃ 고온 환경에서 사용할 수 있는 SiC 반도체 센서 제작이 가능할 것으로 분석되었다. 전류-전압

특성 측정 결과 300℃ 열처리 이후에 Leakage Current가 감소하였다. 이것은 Ni/Au 금속박막의 결합성이 열처리로 인하여 향상되었기 때문으로 분석되며, 박막의 안정으로 스펙트럼 측정시 노이즈 성분은 확연하게 감소하였지만 전체적인 신호 발생량이 감소하였다. 이것은 센서를 구성하는 Wire 및 전극 단자의 손상으로 발생한 것으로 분석된다.



제 5 절 CdZnTe(CZT) 단결정 결정 구조, 비저항, Band Structure 물리적 특성 측정 및 평가

1. 단결정 결정 구조 분석

단결정의 결정 구조 분석에는 일반적으로 XRD 회절 분석법이 사용된다. XRD 분석법은 그림 1과 같이 임의의 결정이고 원자가 간격 d 를 가지고 평행한 격자면 A, B, C ...로 배열되어 있을 때 이 결정에 파장 λ 인 X선을 입사각 θ 로 조사하면, X선은 원자에 의해 모든 방향으로 산란된다. 산란된 X선의 행로차 P 'RP"이 입사 X선 파장의 정수배로 된 X선은 간섭효과에 의해 강해진다. 이 현상을 회절현상이라 하고, 이렇게 하여 발생된 X선을 회절 X선이라 부른다. 회절현상이 발생하는 경우 입사 X선의 파장 λ 및 입사각 θ 와 격자면 간격 d 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

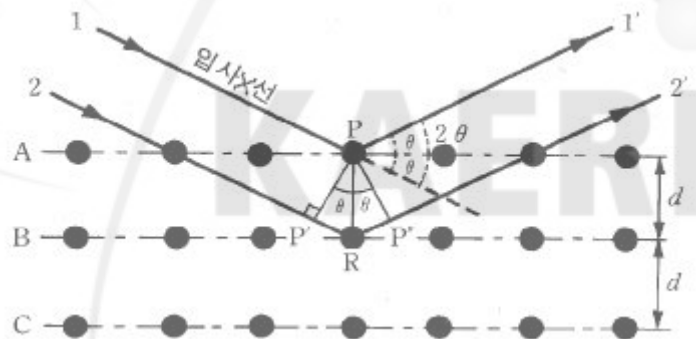


그림 3-5-1. XRD 회절 분석법의 원리

이 관계식을 Bragg식이라 부르며, 회절 X선이 나타내는 입사각 θ 가 정해지면 격자면 간격 d 가 구해지게 된다. 보통, X선 회절법에 관해서는 입사 X선과 격자면이 이루는 각도 θ 보다도 측정계의 기하학적인 배치를 잘 반영하는 각도 2θ (회절각이라 부르고 입사각의 2배를 갖는다)가 사용되고 있다. 조사한 X선의 파장에 대한 2θ - d 대조표가 구해져 있어서, 이 표로부터 격자면 간격 d 를 알 수 있다. 분쇄한 시료를 사용한 분말 X선 회절법에는 각 입자의 배열이 λ 로 존재하여 여러 가지 격자면 간격의 원자면이 나타난다. 입사 X선의 각도를 연속적으로 변화시키면서 회절 X선의 강도를 기록하면 강도가 다른 복수의 회절 peak로부터 형식(Pattern)을 얻을 수 있다. 결정성 물질 원자와 나란한 방향,

즉 결정구조는 물질에 따라 상이하여 회절 형식(Pattern)은 물질에 고유한 값으로 된다.

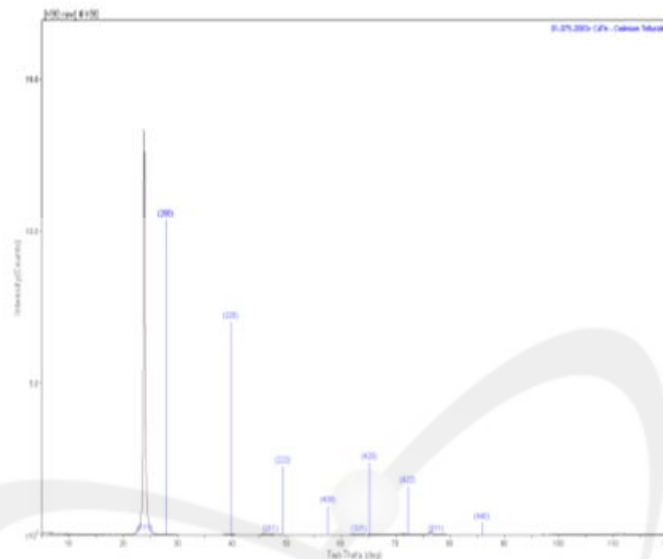


그림 3-5-2. CZT 단결정의 XRD검사 결과, (111) 격자 구조

그림 3-5-2는 한국원자력연구원에서 성장시킨 CZT 단결정의 XRD 검사 결과 있다. 단결정의 주된 격자 방향이 (111) 방향으로 나타났으며 (111) 방향에서 가장 큰 신호가 측정된 것을 통하여 성장된 단결정의 성질이 일정하고 이것을 통하여 단결정의 품질이 우수함을 알 수 있다. 원자력연구원에서 평가 의뢰한 단결정의 경우 과제를 통하여 자체 개발된 공정과 시설을 사용한 것으로 XRD 검사를 통해 개발된 공정과 시설이 성공적이라고 평가할 수 있다.

2. 비저항, Band Sturcture 평가

PL검사는 외부에너지를 가하여 줄 때 그 물질 내의 고유한 전자 상태 간의 전이 (transition)에 의해 흡수된 에너지를 빛 형태로 방출하면서 원래의 평형상태로 되돌아가는 물리적 현상을 이용한 검사 방법이다.

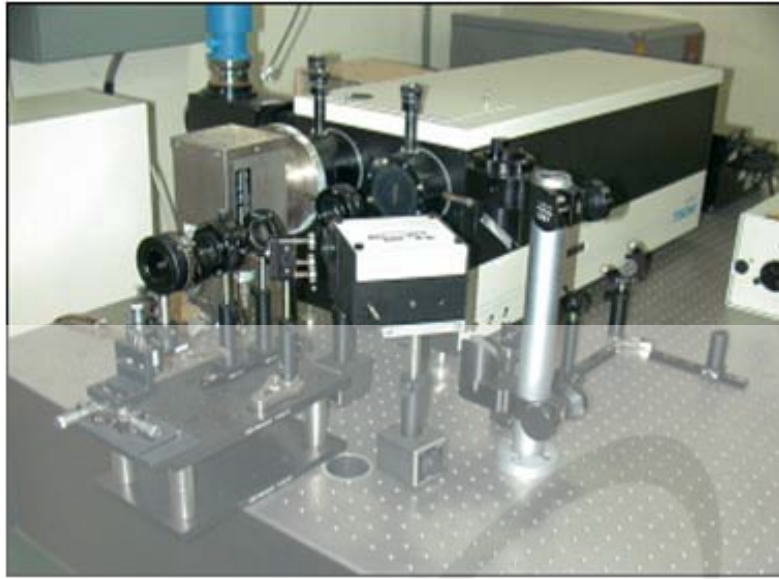


그림 3-5-3. Photoluminescence(PL) 검사 장비의 레이저 발생 장치

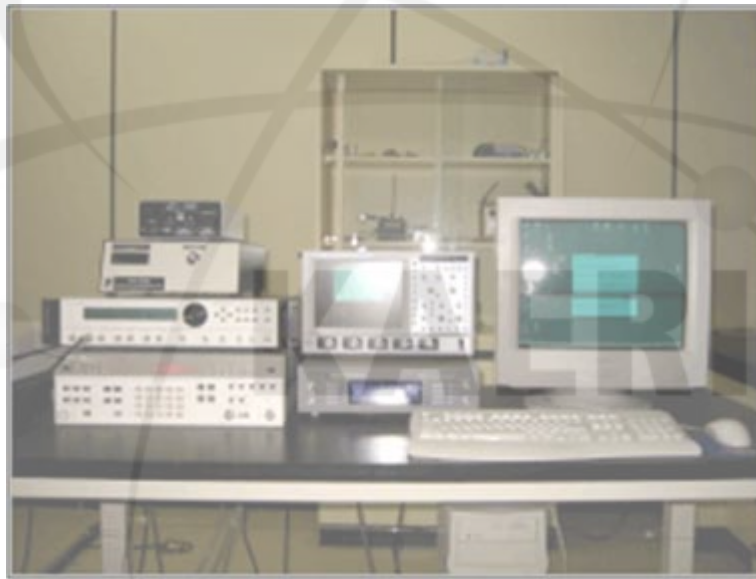


그림 3-5-4. Photoluminescence(PL) 검사 시스템

PL 검사 방법은 다음과 같다.

- 비파괴 평가법으로 검사 대상이 되는 시료는 전극이나 표면연마 등을 필요로 하지 않는다.
- 시료 두께는 $1\ \mu\text{m}$ 정도이고 크기는 PL 장비의 여기 광원의 Spot 크기 이상이면 검사가 가능하다.
- 실험 순서는 laser의 전원을 ON으로 하여 약 30분간 여열 과정을 거친 후에 표준시료를 통한 Spectrometer Calibration 이후에 Sample을 위치시킨 후에 Spectrum을 측

정 후 분석한다.

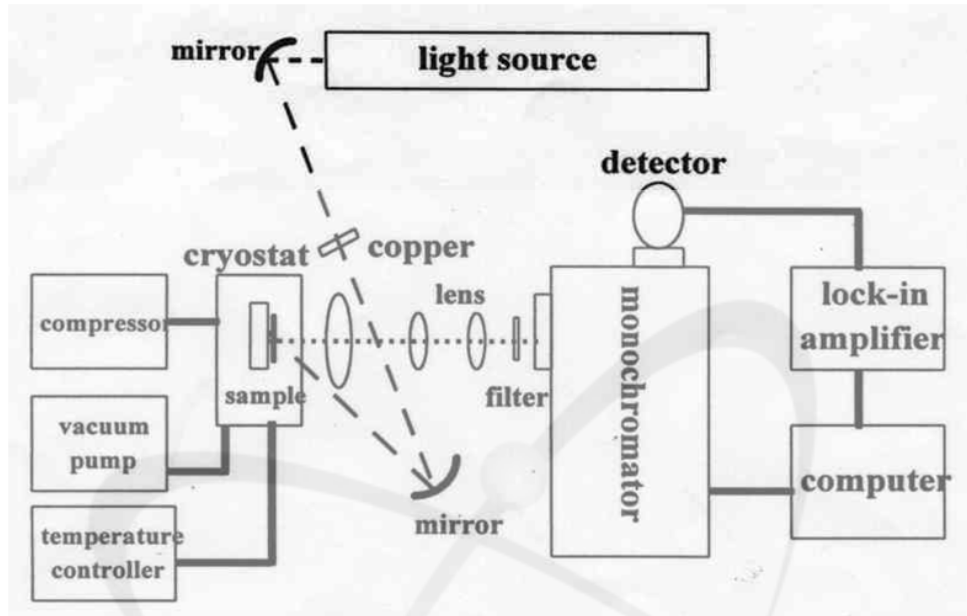


그림 3-5-5. Photoluminescence(PL) 검사 시스템 모식도

PL 검사 장치의 구성은 측정 시료의 Band Gap 이상의 에너지를 갖는 빛을 발생시켜 주는 Light Source 부분과 광 스위치 역할을 해주는 Chopper가 있고, 레이저의 광중에 발진선 이외에 약한 레이저 플라즈마선의 혼입을 차단해주는 간섭필터, 컬러글라스 필터가 사용된다. 레이저의 경우에는 He-Ne 레이저가 Red 계열의 632.8 nm 파장을 발생시키고, Ar 레이저가 Blue 계열의 488 nm, He-Cd 레이저가 UV 계열의 325 nm 파장을 발생시킨다. 이외에도 저온 유지를 위한 Cryostat와 Monochromator 단색화 장치, 검출기, 노이즈 차단을 위한 Lock-in Amplifier가 시스템을 구성하고 있다. PL 검사의 장점은 빠른 측정 시간, 비파괴분석, Beam Alignment, Surface Flatness, Sample Thickness의 영향을 적게 받는 것이고 단점은 불순물, 계면의 밀도 등에 대한 정확한 측정이 어렵고 액체시료에는 적용할 수 없다.

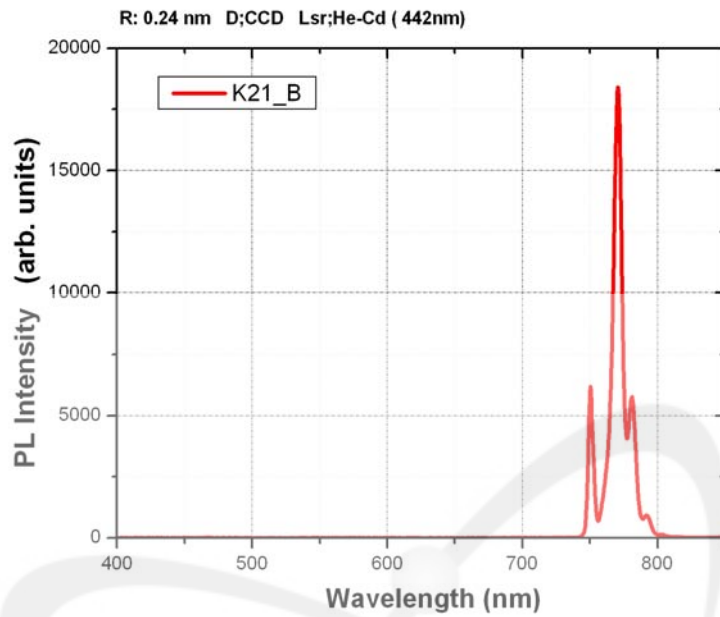


그림 3-5-6. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-2 CdZnTe Sample 스펙트럼

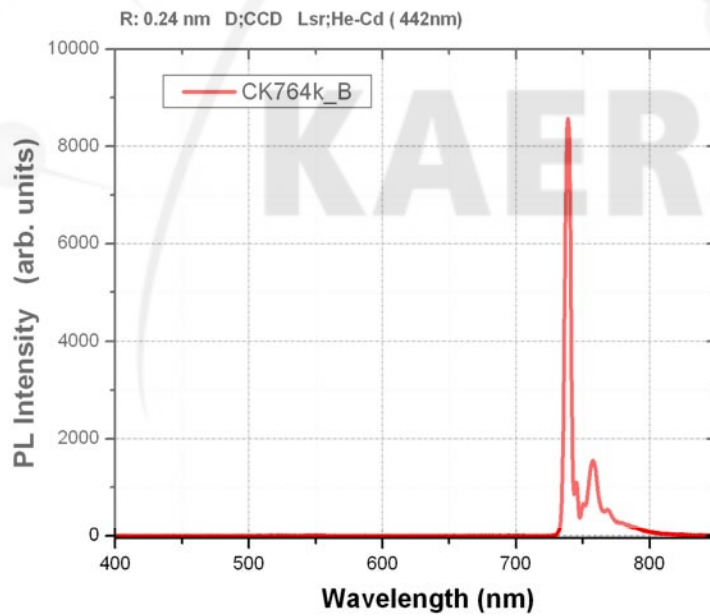


그림 3-5-7. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-7 CdZnTe Sample 스펙트럼

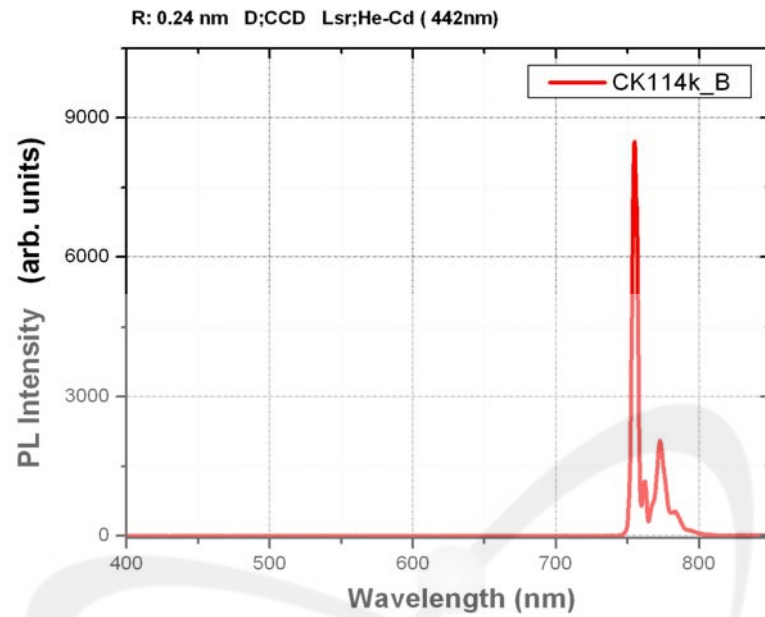


그림 3-5-8. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-11 CdZnTe Sample 스펙트럼

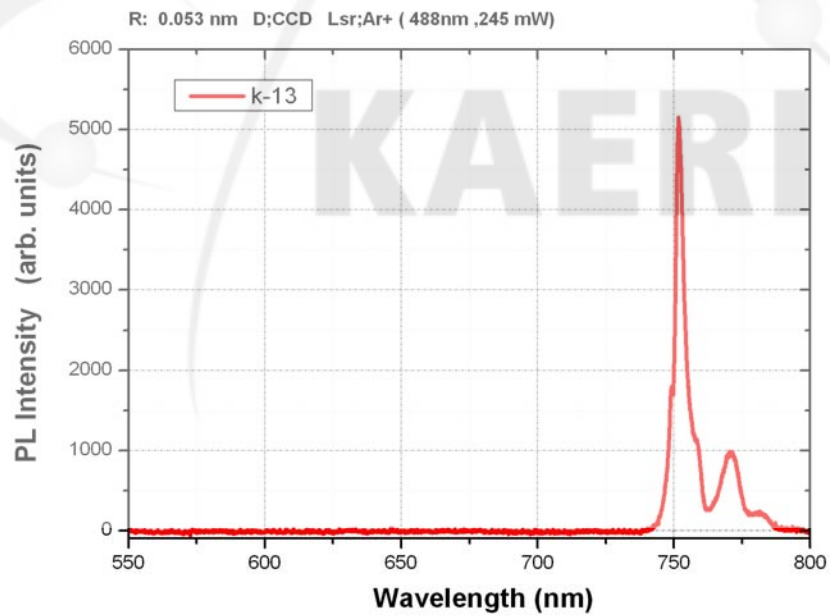


그림 3-5-9. Photoluminescence(PL) 검사로 분석된 K-13 CdZnTe Sample 스펙트럼

한국원자력연구원에서 성장시킨 CZT 단결정에 대한 PL 검사를 그림 3-5-63, 3-5-64, 3-5-65, 3-5-66에 각각 나타냈었다. 각 검사 Sample에 붙여진 K-number(K-2, K-7, K-11, K-13)는 연구원에서 단결정을 성장시킨 공정 순서에 의해 붙여진 것으로 본 위탁 과제에서도 동일한 명칭으로 검사를 수행하고 분석하였다. PL 검사를 통해 측정된 Wavelength와 계산된 Band gap은 표 3-5-1과 같다.

표 3-5-1. PL 검사로 분석된 CdZnTe Sample 스펙트럼 및 Band Gap

CZT Sample	K-2	K-7	K-11	K-13
Wavelength [nm]	770 750 780	738 757	754 772	750 770
Band Gap [eV]	1.61 1.66 1.59	1.68 1.64	1.65 1.61	1.66 1.61

PL검사를 통한 Band Gap 계산은 $E=h\nu$ 식에 통해서 이루어졌다. 주어진 식은 $h\nu = hc/\lambda$ 로 변형될 수 있고 분모항에 PL 검사를 통해 측정된 파장값을 대입하여 각 Sample에 대한 Band Gap을 계산하였다. 계산된 결과 측정에 사용된 Sample 대부분이 1.6 eV 정도의 Band Gap을 나타내었고 이것은 일반적으로 알려져 있는 1.4 ~ 2.2 eV 범위에 있으므로 안정적인 CZT 단결정이 생산된 것으로 분석된다. CZT 단결정의 Band Gap이 일정한 범위 갖는 것은 Zn의 함유량에 따라 달라지기 때문인데 측정에 사용된 Sample에서 일정한 Band Gap을 나타내는 것은 Zn 함유량 공정 또한 안정적으로 이루어지고 있다는 것으로 평가할 수 있다.

비저항은 물질의 성질을 나타내며 CZT Sample의 전류-전압 특성 곡선을 통하여 계산할 수 있다. 그림 3-5-10은 Sample K-11에 대한 전류-전압특성 곡선이고 이것을 통해 계산된 비저항은 그림 3-5-11에 나타냈었다. 계산된 비저항은 107 ohm·cm 수준이었으며 한국원자력연구원에서는 방사선 센서로 사용되었을 때 보다 안정적인 성능을 나타내기 위하여 비저항을 보다 향상 시킬 수 있는 공정을 연구 중에 있다.

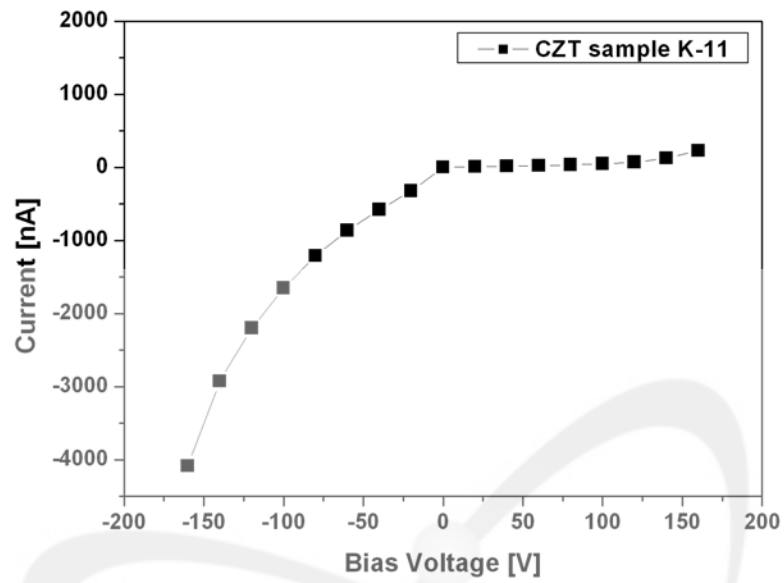


그림 3-5-10. CZT Sample K-11의 전류-전압특성곡선

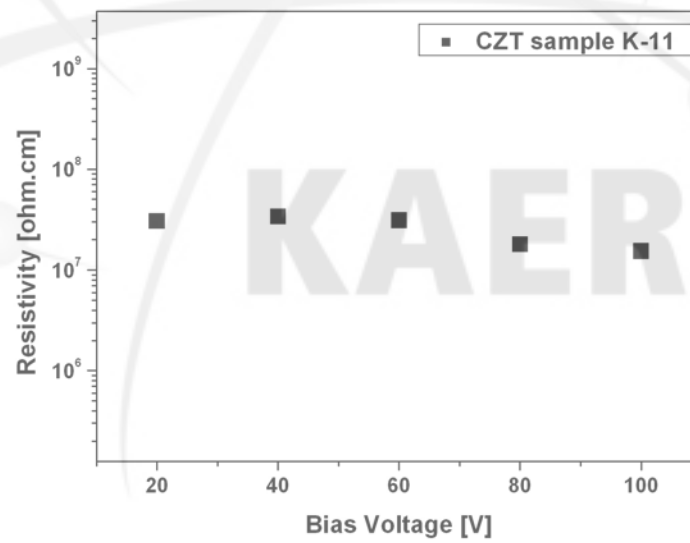
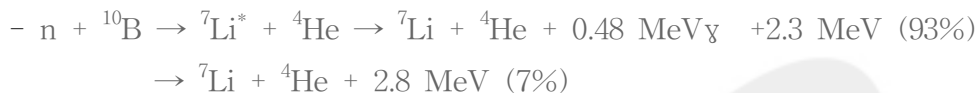


그림 3-5-11. CZT Sample K-11의 비저항

제 6 절 중성자 전환막 물리적 특성 평가

중성자 측정을 위해서 최근에 주목 받고 있는 것은 중성자 반응 박막을 이용하는 방법이 있다. 중성자 검출은 일반적으로 2차 반응에 의해서 이루어지며 이 때 많이 쓰이는 물질로는 ${}^6\text{Li}$ 과 ${}^{10}\text{B}$ 을 들 수 있다. ${}^6\text{Li}$ 과 ${}^{10}\text{B}$ 의 중성자 반응식은 다음과 같다.



한국원자력 연구원은 보유하고 있는 Thermal Evaporator를 이용하여 Boron 박막을 제작하였다. Boron을 증착하기 위하여 Tungsten과 Molybdenum Boat를 사용하였으나 고온을 얻기 위하여 Boat에 높은 전압을 인가한 경우 Boat가 쉽게 끊어지는 현상이 발생하여 효과적으로 Boron 박막을 제작할 수 없었다. 이러한 문제점으로 인하여 중성자 변환 박막은 ${}^6\text{LiF}$ 를 이용하여 증착하였다. ${}^6\text{LiF}$ 의 경우 공기 노출 시 쉽게 박리가 되는 문제점으로 인하여 샌드위치 방식을 통해서 전환박막을 제조하였다. 이렇게 제조된 박막의 표면 특성은 다음과 같다.

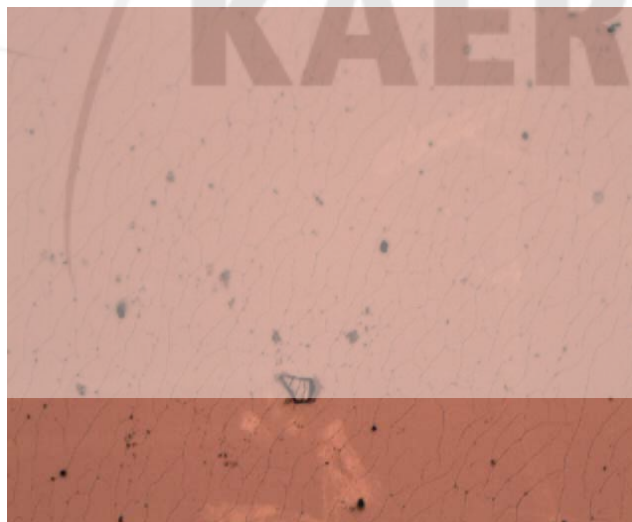


그림 3-6-1. Au/Ni-4H SiC 검출기 표면에 증착된 ${}^6\text{LiF}$ 중성자 전환박막

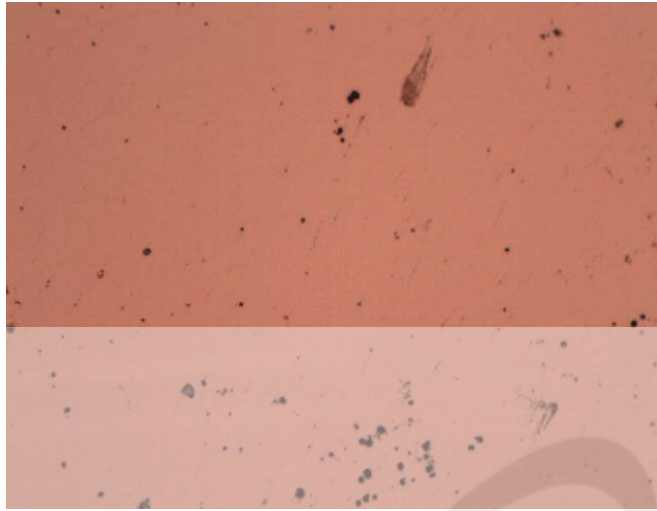


그림 3-6-2. Au/Ni-6H SiC 검출기 표면에 증착된 ${}^6\text{LiF}$ 중성자 전환박막

샌드위치 증착 방식이란 ${}^6\text{LiF}$ 전환 박막 위에 일정 두께 이상의 Au를 증착하여 전환 박막의 공기 노출을 최소화하는 방식이다. 이러한 효과를 높이기 위해 전환박막의 지름은 Au 박막보다 작게 증착한다. 한국원자력연구원에서 의뢰한 전극의 구조는 Au 5mm, ${}^6\text{LiF}$ 3mm의 구조이다. 그림 3-6-1, 3-6-2는 현미경을 통해서 200배로 확대한 전환박막 표면 사진이다. LiF 박막의 특성으로 미세한 갈라짐이 관찰되고 있으나 Au 박막으로 인하여 박리 현상은 발생하지 않고 있다. 이러한 전환 박막에 열처리를 한 경우의 사진은 그림 3-6-3과 같다.

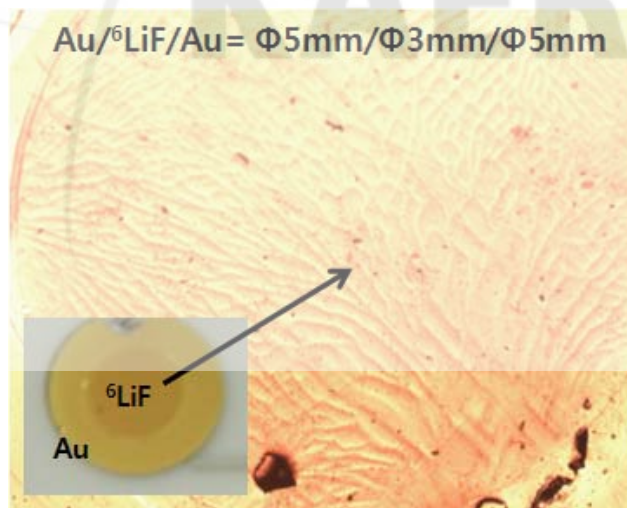


그림 3-6-3. 열처리 이후의 ${}^6\text{LiF}$ 중성자 전환박막

전환박막의 미세한 갈라짐이 더욱 크게 나타났으나, Au 보호 박막으로 인하여 박리현상을 나타나지 않았다. 원자력연구원에서 사용하고 있는 샌드위치 방식의 전환박막 제작

방식은 상온에서 공기 노출시 박리되는 현상을 최소화 하였고 열 스트레스에 의해서도 전환박막의 박리를 방지할 수 있는 구조로 평가될 수 있다. 하지만 현재의 전환박막의 두께는 최대 9 μm 정도로 중성자 반응을 높이기 위해서는 두께 향상이 필요하다.



제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외 기여도

제 1 절 연구개발 목표 및 달성도

1. 최종 목표

차세대 반도체 센서 제작을 위한 방사선 반응 모사 기술 개발 및 시제품의 물리적 특성 평가 방법 개발

2. 당해 단계목표 및 달성도

세부연구목표	주요 연구개발 실적	가 중 치 (%)	달 성 도 (%)	비고 (평가의 착안점)
- 반도체 센서내 방사선 거동 해석	- 반도체 계측기 분석을 위해 사용되는 대표적인 전산모사 코드들과 전기장 분석이 가능한 시뮬레이터들의 특징 분석 - CZT 센서 특성과 두께에 따라 결정되는 측정가능 에너지영역을 확인하고자 MCNPX 코드를 이용하여 센서 두께값에 따른 흡수선량 분포 및 전자생성을 분석 - 평판형 반도체 센서($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)의 Benchmarking 시뮬레이션을 수행하여 방사선 종류 및 에너지에 따른 센서의 Response 특성을 확보 - 방사선에 의해 생성된 전하들의 포집효율을 계산하기 위하여 Hecht 모델과 Drift Diffusion 모델의 특징 분석	15	100	- 방사선 종류 및 에너지별 반응 특성 분석
- 몬테칼로 코드를 이용한 반도체 센서 해석 체계 구축	- 센서로 입사한 방사선으로부터 생성된 이온쌍의 거동을 보다 정확하게 해석하기 위하여 반도체 소자 내에서의 전기장을 반영하고 이온쌍의 이동경로 및 전하 포집효율을 도출함 - 1차년도에 도출된 방사선 종류 및 에너지별 반응 스펙트럼에 이온쌍의 전하 포집효율을 반영하고 실험결과와의 비교를 통한 검증을 수행 - 한국원자력연구원에서 제작된 반도체 센서내에서의 방사선 거동해석을 수행하여 피드백 시킴	15	100	- 반도체 센서 해석체계의 타당성 및 적용 가능성 - 해석체계의 신뢰성 및 성능

- 반도체 센서 설계코드 개발	- 반도체 센서의 설계 및 제작에 실적이 가능한 GUI 기반 설계 코드 개발	20	100	- GUI 기반의 반도체 센서 설계 코드 개발
- 이온 주입 SiC Wafer 분석 및 금속 박막 평가	- 이온 주입된 반도체 웨이퍼 및 공기 중에 노출된 반도체 시편 표면에 자연적으로 형성되는 SiO ₂ 절연층에 대한 Auger 검사를 통해 이온 농도 분석 - 열처리 및 세척 공정에 따른 반도체 시편의 표면 변화 분석을 위한 AFM 촬영 및 Roughness 측정	15	100	- 반도체 검출기 금속박막 표면 특성 평가 - 이온 주입에 따른 Wafer 물성 변화 분석
- 반도체 단결정 물성 및 중성자 변환막 특성 평가	- CZT Passivation 공정 후 반도체 검출기 표면에 대한 물리적 특성 측정 - CZT 단결정 결정 구조 및 비저항 특성 평가 - CZT 단결정 Band Structure 측정 및 평가 - 온도 변화에 따른 중성자 변환막 특성 평가	15	100	- 단결정 구조와 비저항 특성 및 Band Structure 측정 - 중성자 변환막 특성 평가
- 반도체 단결정 및 검출기 특성 평가	- CZT 단결정 결정 구조, 비저항, Band Structure에 대한 물리적 특성 측정 및 평가 - 방사선 조사 후 SiC 반도체 검출기 내부 변화 측정 및 평가 - 고온 환경 노출에 따른 반도체 검출기 특성 변화 측정 및 평가	20	100	- 반도체 단결정 특성과 방사선 조사 및 고온 환경 노출시 검출기 특성평가
총계		100		

KAERI

제 2 절 대외 기여도

방사선 계측기는 원자력 및 방사선 관련 산업 전 분야에서 필수적으로 사용되는 원자력의 핵심 부품이지만 국내에서 사용되고 있는 방사선 계측기는 전적으로 외국 기술에 의존하고 있다. 원자력 산업이 활성화되고 방사선이 보다 폭 넓게 사용될수록 방사선 측정 장비의 활용 가능성은 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서 원자력 산업의 구조 선진화를 위해서는 방사선 계측기 국산화가 필수적 선결 요건이다.

방사선 계측기술의 확보는 핵물리 등의 기초연구, 성분 및 불순물의 검사, 국방, 토목, 의료, 산업 등 다양한 분야에서 널리 활용이 가능하고 여러 학술 및 산업기술 분야의 발전에 지대한 공헌을 할 것으로 예상되며, 새로운 방사선 검출 소재와 계측기술은 의료계의 인체진단 및 치료, 산업계의 공산품 품질관리 향상 그리고 환경방사능 오염검사 등에 필수적으로 사용될 것이고, 측정대상의 물리 화학적 특성에 따른 측정방법 및 측정 장비의 다양화가 예상된다.

방사선 센서 개발의 핵심기술 확보는 우주환경 재료 평가 및 내방사성 우주재료개발과 같은 ST 융합기술, 비 방사성 추적자 물질과 같은 NT 융합기술, 노화억제 기술 및 의료용 진단기술의 BT 융합기술과 연계하여 다양한 적용이 가능하게 한다. 또한, 기존의 방사선 기술 분야의 응용 사각지대인 고고학 및 지구과학에도 저변을 확대할 수 있을 것으로 판단된다.

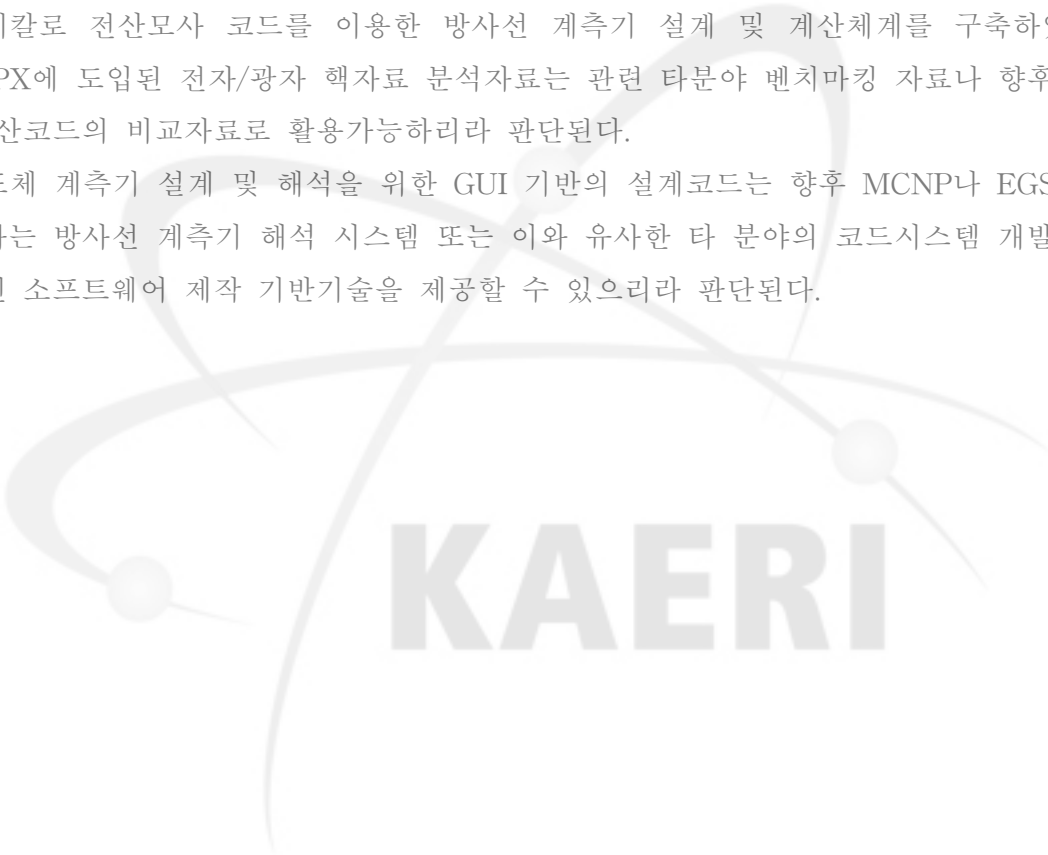
방사선 계측기 기술은 기존의 방사선측정을 이용한 지뢰탐지, 비파괴 검사, 극마모율 측정 장치, 공업용 추적자, 인공위성을 통한 자원탐사, 외계행성 구조탐사, 우주 근원탐색에 이르기까지 광범위하게 이용되는 기술을 지능형으로 대체하는 기술이다. 이러한 기술은 향후 기술의 저변확대와 동위원소 사용의 기술적 안전성 확보와 병행하여 자동차 엔진 등 고온 환경에서 사용가능 스마트 센서 신산업이 창출될 전망이다. 보안 및 안보관련 산업에 핵심 기술인 실시간 방사선량률 및 핵종 동시분석 기술 개발을 통한 감시기술 고도화에 따른 원자력 선진국으로써 지위확보 및 동남아 등 원자력 후진국에 기술을 수출할 수 있다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

본 연구는 “반도체 검출기 기반 기술 개발”과 관련되어 있으며 특히, 널리 사용되고 있는 전자/광자/중성자 수송용 전산코드를 이용하여 방사선 계측기 거동해석 및 설계 기반기술을 구축하는데 있다. 본 연구를 통해 방사선 계측기 분야의 해석 및 설계기술 능력을 제고하고 향후 제작될 고성능 반도체 검출기 설계 기반기술을 확보하였다. 방사선 계측장비 설계 기술 확보로 산업기술 경쟁력 제고 및 수출 기반을 확보할 수 있게 되었다. 또한 연구수행을 통해 첨단 방사선 장비 활용의 활성화로 산업기술 경쟁력을 확보하였다.

몬테칼로 전산모사 코드를 이용한 방사선 계측기 설계 및 계산체계를 구축하였으며 MCNPX에 도입된 전자/광자 핵자료 분석자료는 관련 타분야 벤치마킹 자료나 향후 도입될 전산코드의 비교자료로 활용가능하리라 판단된다.

반도체 계측기 설계 및 해석을 위한 GUI 기반의 설계코드는 향후 MCNP나 EGSnrc를 이용하는 방사선 계측기 해석 시스템 또는 이와 유사한 타 분야의 코드시스템 개발시 실질적인 소프트웨어 제작 기반기술을 제공할 수 있으리라 판단된다.

The logo of KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered in the background. It features a stylized circular emblem with two spheres and intersecting lines, followed by the word "KAERI" in a bold, sans-serif font.

KAERI

제 6 장 참고문헌

- [1] IAEA, Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water, IAEA TRS-398, IAEA (2004).
- [2] P. R. Almond, et al., "AAPM's TG51 Protocol for Clinical Reference Dosimetry of High-energy Photon and Electron Beams," Medical Physics 26 (2004) 1847-1870.
- [3] D. Pelowitz (Ed.), MCNPX User's Manual Version 2.5.0, LA-CP-05 -0369, LANL (2005).
- [4] S. Agostinelli, et al., "Geant4-A Simulation Toolkit," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506 (2003) 250-303.
- [5] I. Kawrakow and D. W. O. Rogers, "EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron Photon Transport," PIRS-701, National Research Council of Canada (2004).
- [6] Silvaco, ATLAS User's Manual," Silvaco International.
- [7] P. A. Smith, et al., "Electric-field Assisted Assembly and Alignment of Metallic Nanowires," Applied Physics Letters 77 (2000) 1399-.
- [8] Ruqing Wang and X. Allen Li, "Monte Carlo Dose Calculations of Beta-emitting Sources for Intravascular Brachytherapy: A Comparison Between EGS4, EGSnrc, and MCNP," Medical Physics 28 (2001) 134-141.
- [9] Tadayuki Takahashi and Shin Watanabe, "Recent Progress in CdTe and CdZnTe Detectors," IEEE Transactions on Nuclear Science 48 (2000) 100-108.
- [10] K. O. Kim, J. K. Kim, J. H. Ha, and S. Y. Kim, "Analysis of Charge Collection Efficiency for a Planar CdZnTe Detector," Nuclear Engineering and Technology 41 (2008) 723-.
- [11] K. Hecht, "Zum Mechanismus des lichtelektrischen Primastomes in isolierenden Kristallen," Zeits.Phys. 77 (1932) 235-.

- [12] Mathworks, MATLAB: The Language of Technical Computing, Creating Graphical User Interfaces Version 7
- [13] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AES__Setup2.JPG
- [14] <http://www.geobacter.org/research/nanowires/images/jpg/>
- [15] <http://www3.physik.uni-greifswald.de/method/afm/eafm.htm>
- [16] L.M.Porter et. al., J. Mater. Res, 10, 26(1995)



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
		KAERI/CM-1319/2009			
제목 / 부제		반도체 방사선 계측기 설계 전산모사 및 특성측정 기술 개발			
연구책임자 및 부서명		김종경(한양대학교)			
연구자 및 부서명		이우교(한양대학교), 김순영(한양대학교), 신창호(한양대학교) 김경오(한양대학교), 박정민(한양대학교), 장도윤(한양대학교) 강정수(한양대학교)			
출판지	대한민국	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010.
페이지	89	도표	있음(x), 없음()	크기	26Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(X), 대외비()		보고서종류		
연구위탁기관	한양대학교 산학협력단		계약번호		
초록 (15-20줄내외)		○ MCNPX 코드를 이용하여 CZT 센서 투과깊이에 따른 흡수선량 분포 및 전자생성을 분석 ○ 저에너지 감마선과 알파입자를 이용하여 반도체 계측기 내부 전압변화에 따른 측정 스펙트럼 변화를 분석 ○ 이온쌍의 전하포집을 효율을 고려하여 수행된 몬테칼로 전산모사 결과를 반도체 계측기의 측정결과와 비교/분석함으로써 계산의 정확성 확보는 물론 해석체계의 성능 및 신뢰성을 확보하였음 ○ 본 연구에서 개발된 GUI 기반의 반도체 센서 설계코드는 국내최초로 개발을 완료하였으며 한국원자력연구원에서 개발 중인 CZT 계측기의 성능평가 및 개선작업에 중요한 역할을 수행할 수 있을 것으로 예상 ○ 이온 주입된 반도체 웨이퍼 및 공기 중에 노출된 반도체 시편 표면에 자연적으로 형성되는 SiO₂ 절연층에 대한 Auger 검사를 통해 이온 농도 분석 ○ 열처리 및 세척 공정에 따른 반도체 시편의 표면 변화 분석을 위한 AFM 촬영 및 Roughness 측정 ○ CZT Passivation 공정 후 반도체 검출기 표면에 대한 물리적 특성 측정 ○ CZT 단결정 결정구조 및 비저항 특성 평가 ○ CZT 단결정 Band Structure 측정/평가 ○ 온도 변화에 따른 중성자 전환막 특성평가 ○ CZT 단결정 결정 구조, 비저항, Band Structure에 대한 물리적 특성 측정/평가 ○ 방사선 조사 후 SiC 반도체 검출기 내부 변화 측정/평가 ○ 고온 환경 노출에 따른 반도체 검출기 특성 변화 측정/평가			
주제명키워드 (10단어내외)		상온반도체, 모사기술, 반도체 검출기, 광역 반도체, 방사선 반응, 표면 분석, 금속박막			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
		KAERI/CM-1319/2009			
Title/ Subtitle		Simulation and Performance Test Technology Development for Semiconductor Radiation Detection Instrument Fabrication			
Project Manager and Department		Jong Kyung Kim, Hanyang University			
Researcher and Department		Woo Gyo LEE, S. Y. KIM, Chang-Ho SHIN			
		Kyung-O KIM, Jeong Min Park, Doh Yun Jang Jeong Soo Kang			
Publication Place	Korea	Publisher	KAERI	Publication Date	2010
Page	p.89	Ill. & Tab.	Yes(x), No ()	Size	26Cm.
Note					
Open	Open(X), Closed ()		Report Type		
Classified	Restricted(), ____Class Document				
Performing Org.	Hanyang University Industry Digital Park		Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		○Analysis on the Absorbed Dose and Electron Generation by Using MCNPX Code ○Analysis on the Change of Measured Energy Spectrum As a Function of Bias Voltage Applied in Semiconductor Detector ○Comparison of Monte Carlo Simulation Considering the Charge Collection Efficiency and Experimental Result ○Development of Semiconductor Sensor Design Code Based on the Graphic User Interface ○Analysis on Depth Profile of Ion-implanted Semiconductor Wafer Surface and Naturally Generated SiO₂ Insulation Layer Using Auger Electron Spectroscopy ○Measurement of AFM Images and Roughness to Abalyze Surface of Semiconductor Wafer with respect to Annealing and Cleaning Process ○Measurement of Physical Properties for Semiconductor Detector Surface after CZT Passivation Process ○Evaluation of Crystal Structure and Specific Resistance of CZT ○Measurement/Analysis on Band Structure of CZT Crystal ○Evaluation of Neutron Converter Layer with respect to Change in Temperature ○Measurement/Evaluation of physical characteristics for lattice parameter, specific resistance, and band structure of CZT crystal ○Measurement/Evaluation of lattice transition of SiC semiconductor detector after radiation irradiation ○Measurement/Evaluation of performance of semiconductor detector with respect to exposure in high temperature environment			
Subject Keywords (About 10 words)		Room Temperature Semiconductor, Simulation Technology, Semiconductor Detector, Wide Bandgap Semiconductor, Radiation Response, Surface Analysis, Metal Film			