

탄화규소 반도체 방사선 센서  
기술 동향 분석

Analysis of Technology Trend on a SiC Semiconductor  
Radiation Sensor

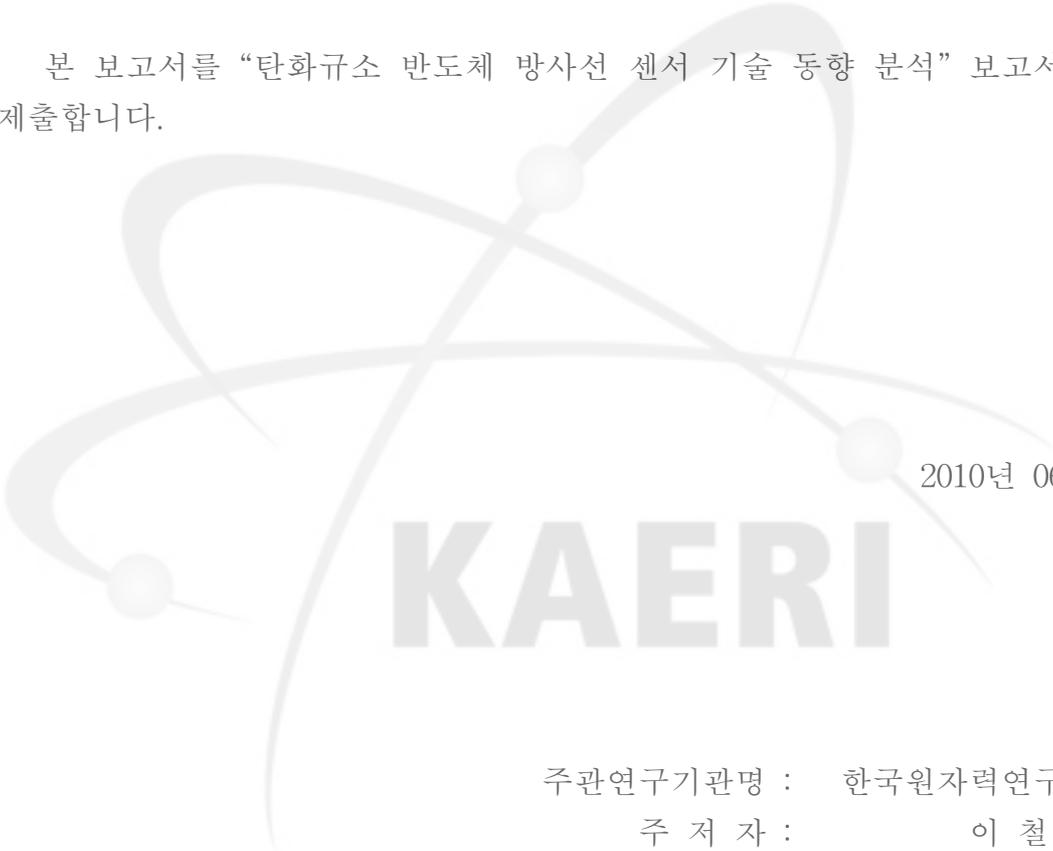
*KAERI*

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 “탄화규소 반도체 방사선 센서 기술 동향 분석” 보고서로 제출합니다.

2010년 06월



KAERI

주관연구기관명 : 한국원자력연구원

주 저 자 : 이 철 호

공동저자 : 하 장 호

박 세 환

김 한 수

## 요 약 문

탄화규소는 실리콘과 탄소의 큰 결합에너지로 인해 화학적, 물리적으로 안정하며, 650℃의 고온에서도 동작이 가능하여 기존의 반도체 응용분야를 대체할 물질로 각광받고 있다.

본 보고서는 최신 탄화규소 반도체 방사선 센서 연구 동향을 분석하여 국내 탄화규소 기반 반도체 방사선 센서 연구개발 방향을 제시하고자 한다. 탄화규소 반도체의 구조와 전기적 특성에 대해 기술하였으며, 센서 제작을 위한 에피층 성장 및 접합 기술에 대해 기술하였으며, 하전·비하전입자에 대한 탄화규소 반도체 센서의 검출 특성과 방사선 조사로 인해 생기는 반도체 센서의 방사선노화 특성도 포함하고 있다.

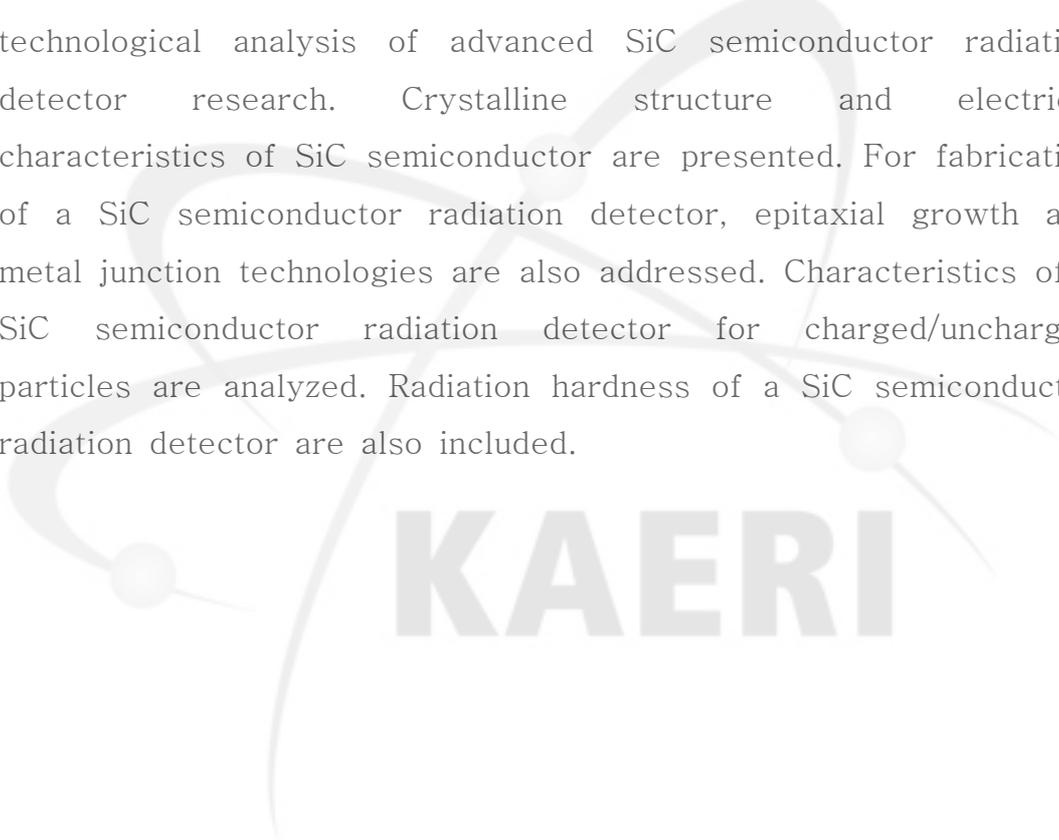


KAERI

## Summary

Silicon carbide(SiC) is promising semiconductor materials by virtue of its chemical and physical stabilities due to high atomic binding energy between silicon and carbon.

This report is for suggestion of future domestic research direction based on SiC semiconductor radiation detector by technological analysis of advanced SiC semiconductor radiation detector research. Crystalline structure and electrical characteristics of SiC semiconductor are presented. For fabrication of a SiC semiconductor radiation detector, epitaxial growth and metal junction technologies are also addressed. Characteristics of a SiC semiconductor radiation detector for charged/uncharged particles are analyzed. Radiation hardness of a SiC semiconductor radiation detector are also included.

A large, faint watermark of the KAERI logo is centered on the page. The logo consists of the word "KAERI" in a bold, sans-serif font, with a stylized graphic of three curved lines and three dots above it, resembling a molecular or atomic structure.

KAERI

# Contents

|  |     |
|--|-----|
| Summary(Korean) .....                                      | i   |
| Summary .....  | ii  |
| Contents .....   | iii |
| Contents(Korean) .....                                     | iv  |
| Figure Contents .....                                      | v   |
| Table Contents .....                                       | vii |
| <br>   |     |
| I. Semiconductor Theory .....                              | 1   |
| <br>   |     |
| II. Characterization of SiC Semiconductor .....            | 7   |
| <br>   |     |
| III. SiC Semiconductor Sensor and Radiation Response ..... | 13  |
| 1. SiC Epitaxial Growth Process .....                      | 13  |
| 2. SiC Semiconductor Sensor .....                          | 19  |
| 3. SiC Semiconductor Radiation Sensor .....                | 22  |
| 4. Radiation Detection of SiC Semiconductor Sensor .....   | 33  |
| (1) Charged/Uncharged Particles Measurement .....          | 34  |
| (2) X-ray Spectrum Measurement .....                       | 45  |
| <br>   |     |
| IV. Radiation Damage of SiC Semiconductor .....            | 50  |
| <br>   |     |
| V. Recent Study Trend of SiC .....                         | 54  |
| 1. International Study Trend .....                         | 54  |
| 2. Domestic Study Trend and Prospect .....                 | 56  |
| <br>   |     |
| References .....   | 58  |

# 목 차

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 요 약 문 .....                   | i   |
| Summary .....                 | ii  |
| Contents .....                | iii |
| 목 차 .....                     | iv  |
| 그림목차 .....                    | v   |
| 표 목차 .....                    | vii |
| <br>                          |     |
| 제1장 반도체 이론 .....              | 1   |
| <br>                          |     |
| 제2장 탄화규소 반도체 물질 특성 .....      | 7   |
| <br>                          |     |
| 제3장 탄화규소 반도체 센서 및 방사선 반응..... | 13  |
| 1절 SiC 에피층 성장 공정.....         | 13  |
| 2절 SiC 반도체 센서.....            | 19  |
| 3절 SiC 반도체 방사선 센서.....        | 22  |
| 4절 SiC 반도체 센서의 방사선 검출 특성..... | 33  |
| 1. 전하/비전하 입자측정.....           | 34  |
| 2. 엑스선 스펙트럼 측정 .....          | 45  |
| <br>                          |     |
| 제4장 탄화규소 반도체 센서의 방사선 노화 ..... | 50  |
| <br>                          |     |
| 제5장 연구 개발동향 .....             | 54  |
| 1절 해외 연구개발 동향 .....           | 54  |
| 2절 국내 연구개발 동향 및 전망 .....      | 56  |
| <br>                          |     |
| 참고문헌 .....                    | 58  |

## 그 립 목 차

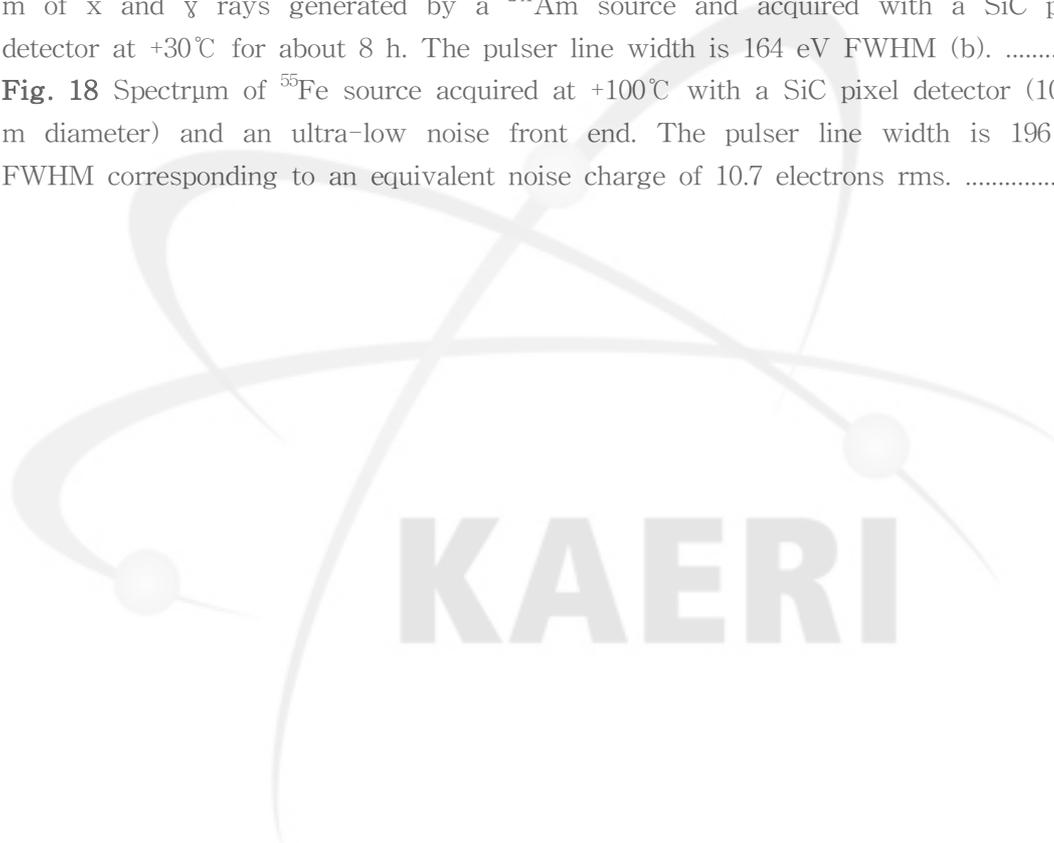
|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 1</b> SiC의 원자배치도 .....   | 9  |
| <b>Fig. 2</b> 여러 반도체의 밴드갭 에너지.....   | 10 |
| <b>Fig. 3</b> 고온환경에 적용되는 반도체 소자의 응용분야 .....  | 11 |
| <b>Fig. 4</b> 최근 보도된 SiC의 열저항과 항복 전압.....  | 18 |
| <b>Fig. 5</b> The current density as a function of the mean electric field acquired with diodes realized on materials employed in most commercial radiation detectors. ....  | 20 |
| <b>Fig. 6</b> The current as a function of the bias acquired with dot circular Schottky diodes (area=0.31 mm <sup>2</sup> ) realized on 4H-SiC semiconductor in (a) forward polarization and (b) reverse polarization.....   | 28 |
| <b>Fig. 7</b> The reciprocal of the square capacitance, $1/C^2$ , versus reverse voltage acquired with dot circular Schottky diodes (area =0.31 mm <sup>2</sup> ) realized on 4H - SiC semiconductor (a). Profile of the free carrier concentration for two undoped 4H - SiC epitaxial layers (b). The profile, derived from capacitance - voltage measurements on Schottky diodes, corresponds to the unintentional active dopant profile as a function of the distance from the junction. .... | 31 |
| <b>Fig. 8</b> Reverse Current vs Number of pixels .....  | 32 |
| <b>Fig. 9</b> The CCE dependence on the reverse bias for Schottky 4H - SiC diodes irradiated by 1.5 and 2.0 MeV protons. The solid lines are the best-fit curves obtained by using the drift-diffusion expression (3). The inset shows the schematic Schottky diode structure mostly used in this detector performance study. ....   | 33 |
| <b>Fig. 10</b> Bragg ionization curves of 1.5 and 2.0 MeV protons in a 4H - SiC epitaxial layer of 35 $\mu\text{m}$ thickness and depletion region dependence on the applied reverse bias for Schottky diodes realized on it. ....   | 34 |
| <b>Fig. 11</b> IBIC map (b) of a 4H - SiC diode with the relevant spectrum (a) collected at room temperature with a reverse bias voltage of 20 V. A focused 1.5 MeV proton ion beam (spot size $\sim 5 \mu\text{m}$ ) has been used. ....  | 40 |
| <b>Fig. 12</b> X-ray photocurrent maps of two 4H - SiC Schottky diodes ( $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ). ....  | 41 |
| <b>Fig. 13</b> XBIC maps of defective zones acquired with a photon energy of 3 keV and unbiased 4H - SiC Schottky diodes. ....   | 41 |
| <b>Fig. 14</b> XBIC (a) and IBIC (b) profiles acquired perpendicularly to the electrode border of the microdiode of figure 12. The XBIC profile evidences an electric field enhancement in the proximity of the electrode border. ....   | 42 |
| <b>Fig. 15</b> Collected charge dependence on the applied reverse bias for SiC Schottky  |    |

diodes irradiated by beta particles (MIPs). The inset shows the pulse height spectra ( $\bullet$ ) fitted with a Landau ( $-\cdot-\cdot-$ ) and a Gaussian ( $-$ ) distribution. The x axis scale has been converted into units of electron charge. .... 43

**Fig. 16** Epithermal neutron spectrum acquired with ( $\bullet$ ) and without ( $\circ$ ) the LiF converter. It can be observed that the maximum particle energy is due to 2.73 MeV tritium, as expected for epithermal neutrons. Large area ( $20 \text{ mm}^2$ ) Schottky diodes polarized at 80 V have been used. .... 45

**Fig. 17** Spectrum of  $^{55}\text{Fe}$  source acquired at  $+27^\circ\text{C}$  with a SiC pixel detector ( $100 \mu\text{m}$  diameter) and an ultra-low noise front-end. The pulser line width is 144 eV FWHM corresponding to an equivalent noise charge of 7.8 electrons rms (a). Spectrum of x and  $\gamma$  rays generated by a  $^{241}\text{Am}$  source and acquired with a SiC pixel detector at  $+30^\circ\text{C}$  for about 8 h. The pulser line width is 164 eV FWHM (b). .... 47

**Fig. 18** Spectrum of  $^{55}\text{Fe}$  source acquired at  $+100^\circ\text{C}$  with a SiC pixel detector ( $100 \mu\text{m}$  diameter) and an ultra-low noise front end. The pulser line width is 196 eV FWHM corresponding to an equivalent noise charge of 10.7 electrons rms. .... 48



# 표 목 차

**Table. 1** Ideality factor,  $n$ , and Schottky barrier height, SBH, for diodes realized on 4H - SiC semiconductor (area = 0.31 mm<sup>2</sup>) as a function of temperature and forward bias, respectively. In such calculations the experimental I/V data of figure 2 were used..... 29



## 제1장 반도체 이론

물질은 원자라는 아주 작은 입자로 구성되어 있다. 원자는 원소의 성질을 유지하고 있는 가장 작은 입자이다. 지금까지 알려진 109개의 원소는 원자에 차이가 있으며, 이들은 각각의 고유한 원자구조를 가지고 있다. 고전적인 보어의 모델에 따르면, 원자는 중앙의 핵과 그것을 둘러싸고 있는 궤도 전자로 구성되어 있으며, 이 구조는 태양계와 같은 구조로 보인다. 이 핵은 (+) 전하를 띠는 양성자와 전기적으로 중성인 중성자로 구성된다. (-) 전하의 기본 입자는 전자라고 한다. 각각의 원자는 특정한 수의 전자와 양성자를 갖고 있으며, 이들 수에 의해 다른 원소의 원자와 구별된다. 예를 들어 가장 간단한 수소원자는 1개의 양성자와 1개의 전자를 가지고 있다. 또 다른 예로 헬륨 원자는 핵 내에 2개의 양성자, 2개의 중성자와 핵의 궤도에 2개의 전자가 회전하고 있다.

전자는 원자핵으로부터 일정 거리의 궤도에서 회전한다. 핵 가까이에 있는 전자는 먼 궤도에 있는 전자보다 작은 에너지를 갖는다. 원자구조 내에서 각 전자의 에너지는 고유의 값을 갖는데 이를 불연속적인 값을 갖는다고 한다. 결과적으로 각각의 전자들은 핵으로부터 불연속적인 거리에서 자기만의 궤도를 가져야 한다. 핵으로부터 불연속적인 거리는 각 에너지 준위에 해당된다. 원자 내에서 궤도들은 전자각이라고 알려진 에너지 띠로 묶인다. 원자는 일정한 전자각을 가지며, 각각의 전자각은 허용되는 에너지 준위에 일정한 최대 전자를 가지고 있다. 전자각 내에서의 에너지 준위의 차이는 전자각들 간의 에너지 차이보다 대단히 작다. 전자각들은 핵에서 가장 가까운 순서로 1, 2, 3 과 같이 나타낸다. 여기서 첫 번째 전자각은 한 개의 에너지 준위를 가지며, 두 번째 각은 두 개의 에너지 준위를 갖는다. 원자의 종류에 따라 원자각은 더 존재할 수도 있으며, 원소에 따라 다르다. 각 원자각 내의 전자 수는 수식  $2N^2$  를 이용해 예측할 수 있다. 여기서 N은 전자각의 개수이다. 원자의 첫 번째 전자각은 2개까지, 두 번째 전자각은 8개까지, 세 번째 전자각은 18개까지, 네 번째 전자각은 32개까지 존재할 수 있다.

물질을 전기전도도에 따라 구분하면 구리, 은, 백금과 같은 전기를 잘 통하는 전도체(Conductor)와 종이, 플라스틱, 고무와 같이 전기가 전혀 흐를 수 없는 절연체(Insulator) 그리고 도체와 절연체의 중간 정도의 전기전도도를 띄는 반도체(Semiconductor)로 크게 구분된다. 도체는 쉽게 전류가 흐르는 물질이다. 도체에는 많은 수의 자유전자가 있으며, 원자 구조적으로 1개에서 3개까지의 가전자를 갖는 것이 특징이다. 대부분의 금속은 좋은 도체로, 은이 최상의 도체이며, 그 다음이 구리이다. 구리는 은보다 가격이 싸기 때문에 도체 재료로 가장 폭넓게 이용되고 있다. 구리선은 주로 전자회로 내의 도체로 이용된다. 절연체는 전류를 억제하는 부도체이다. 실제로 절연체는 전류의 흐름을 차단하기 위하여 이용한다. 전도성 물질에 비하여, 절연체는 극소수의 자유전자를 가지고 있으며, 원자 구조 내에 4개 이상의 가전자를 가지고 있는 특성이 있다.

반도체는 도체보다는 자유전자를 적게 가지고 있기 때문에 전류를 전송하는 능력이 도체보다는 아래 등급으로 분류된다. 어떤 물질이 반도체라고 정의되기 위해서는 전기전도도를 포함한 다음과 같은 성질을 만족해야 한다.

- 전도체와 절연체의 중간 정도의 전도 특성을 보여야 함
- 온도가 증가하면 저항이 감소됨
- 불순원소 첨가에 의해 전기적 특성 변화가 크게 나타남
- 광전효과, 홀효과, 정류작용 등의 특수현상이 나타남

반도체는 원자 구조적으로 4개의 가전자를 가지고 있다. 그러나 독특한 특성으로 인해, 어느 반도체 물질은 다이오드, 트랜지스터 및 집적회로 등 오늘날 전자소자를 만드는 재료의 기반이 되고 있다. 실리콘과 게르마늄은 가장 대표적인 반도체 물질이다. 반도체는 구성 원소에 따라 원소 반도체, 화합물 반도체와 합금 반도체 등으로 구분된다. 원소 반도체는 실리콘(Si), 게르마늄(Ge)과 같은 순수한 성분의 단일 원소로 이루어진 반도체이며 주기율표에서 4족 원소에 해당된다. 화합물 반도체는 갈륨비소(GaAs), 갈륨인(GaP), 인듐인(InP)과 같이 주기율표에서 3족과 5족(또는

2족과 6족) 원소를 화합하여 만든 반도체이다. 이들은 결합에너지가 크고 높은 전자이동도를 가지며 발광소자 등에 응용이 가능하다. 합금반도체는  $Al_xGa_{1-x}As$ 와 같이 3족 원소인 Al과 Ga 원소를 일정비율로 조합하여 5족 원소인 As와 합하여 합금 반도체를 형성한다. 배합성분비와 결정구조에 따라 반도체 성질을 제어할 수 있다.

대표적인 반도체 물질은 Si과 Ge이다. 이 두 반도체의 원자는 각각 4개의 가전자들을 갖는다. 이들 원자의 차이점은 Si은 14개, Ge은 32개의 양성자로 핵이 구성되어 있다는 것이다. Ge의 가전자들은 네 번째 각에 있는 반면, Si의 가전자들은 핵에서 가까운 세 번째 각에 있다. 그러므로 Ge의 가전자들이 Si 가전자보다 더 높은 에너지대에 있어서 조그만 양의 에너지를 받아도 쉽게 핵으로부터 이탈할 수 있다. 이러한 이유 때문에 높은 온도에서 Ge이 불안정하므로 Si 반도체가 더 널리 이용된다.

어느 원자가 고체 형태의 분자로 결합할 때 그들 스스로 정렬된 형태인 결정이 형성된다. 이 결정체 구조 내에서 원자들은 각각의 가전자들 사이의 상호작용에 의해서 발생하는 공유결합에 의해 형태가 유지된다. 이러한 Si 고체 덩어리를 결정체라고 부른다. 4개의 가전자를 갖는 Si 원자는 주위에 있는 다른 4개의 원자와 전자를 공유한다. 결국 실질적으로는 8개의 가전자들로 구성되어 화학적으로 안정되게 하는 결합을 공유결합이라고 하고 공유되는 각각의 전자들은 이웃하는 2개의 원자들에 의해 똑같이 구심력이 작용한다.

상온에서 진성 Si 결정 내의 가전자들은 주위로부터 충분한 열에너지를 얻어 가전자대로부터 금지대역을 지나 자유전자가 되는 전도대로 이동하게 된다. 전자 1개가 전도대로 이동하게 되면 가전자대에는 하나의 빈자리가 생기게 된다. 이러한 공백을 정공(hole)이라 부른다. 외부 에너지를 얻어 전도대로 자리 변환을 한 모든 가전자대의 전자의 자리에는 빈자리가 생기게 되므로 전자-정공 쌍을 만든다. 이와 반대로 전도대에 있는 전자가 에너지를 잃어 가전자대의 빈자리로 다시 오게 되는 현상을 재결합이라 부른다. 이상을 요약하면, 상온에서 다른 물질이 없는 순수한 Si 원자들의 자유전자들은 불규칙하게 떠돌아다니게 되며, 전도대로 이동한 전자 수만큼의 정공이 발생한다.

불순물이 없는 진성 반도체에서 자유전자는 거의 없으므로, Si 및 Ge은 순수한 상태로는 유용하지 못하다. 전류는 자유전자의 수에 비례하기 때문에 이러한 순수 반도체는 절연체나 도체가 되지 못한다. 절연체, 반도체 그리고 도체에 대한 에너지 대역은 전도 특성과 관련하여 근본적인 차이점을 보여주고 있다. 절연체의 에너지 갭은 너무 넓어서 전자들이 외부에서 에너지를 쉽게 얻어도 전도대로 이동할 수 없다. 반면에 구리와 같은 도체의 가전자대와 전도대는 중복이 되어 외부 에너지가 없어도 항상 많은 자유전자들이 존재한다.

반도체 자체는 전류를 잘 흐르게 하지 못하므로 순수한 상태의 반도체는 가치가 별로 없다. 그 이유는 전도대에 존재하는 자유전자수와 가전자대에 존재하는 정공의 수가 적기 때문이다. 따라서 진성 Si을 가공하여 많은 전자와 정공이 존재하도록 하여 전도도를 증가시켜 전자소자를 만들 수 있게 해야 한다. 이렇게 하기 위해서는 불순물을 첨가해야 한다. 이러한 불순물을 첨가한 반도체를 불순물 반도체(extrinsic semiconductor)라 하는데, 여기에는 모든 반도체 소자의 기본이 되는 n형과 p형 2가지 종류가 있다.

Si과 같은 반도체의 전도도를 현격히 증가시킬 수가 있는데, 이는 진성 반도체에 불순물을 첨가하여 조절할 수 있다. 이러한 과정을 도핑이라 하며, 이는 전기를 전도하는 캐리어(전자나 정공)의 수를 증가시킨다. 불순물에는 n형과 p형의 두 종류가 있다.

진성 Si 반도체의 전도대에 있는 전자수를 증가시키기 위해서는 5가 원자인 불순물을 첨가한다. 이 원자들은 5개의 가전자를 갖고 있는 비소(As), 인(P), 안티몬(Sb) 등이며, 여분의 전자를 반도체의 결정구조에 제공하기 때문에 도너(donor)원자로 알려져 있다. 5가의 원자는 이웃하는 4개의 Si 원자들과 공유결합을 형성하는데 4개의 가전자만이 이용되고, 1개의 전자가 남게 된다. 이 여분의 전자는 어느 원자와도 결합하지 못하므로 전기전도 역할을 하는 전자가 된다. 이러한 전자들의 수는 불순물의 양에 비례하게 된다. 다수 캐리어와 소수 캐리어 전류를 형성하는 대부분의 입자가 전자인 경우는 도핑된 Si은 n형 반도체를 이룬다. n형 반도체에서 전자들은 다수 캐리어라 부른다. 비록 n형에서 다수의 전류입자가

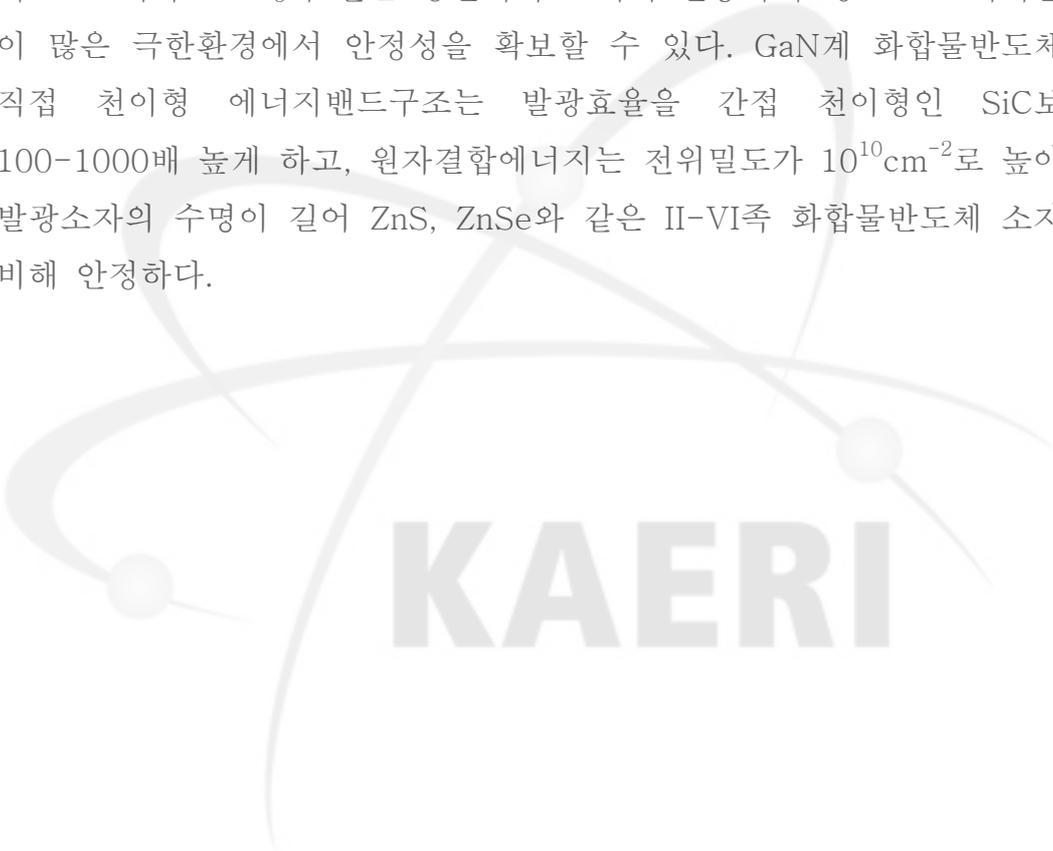
전자라 하여도 정공도 존재하게 마련이다. 여기서 정공은 5가 불순물을 첨가한 것에 의하여 만들어진 것은 아니다. n형 반도체에서 정공을 소수 캐리어라 한다.

순수한 Si에서 정공 수를 증가시키기 위해서는 3가의 불순물 원자를 첨가한다. 이러한 원자들은 3개의 가전자를 갖는 알루미늄(Al), 붕소(B)와 갈륨(Ga) 등으로 반도체 결정 내에서 정공을 남긴다. Si이 3가의 붕소 원자를 둘러싼 구조에서, 3개의 모든 붕소 가전자들은 공유결합에 사용되고 4번째 전자가 모자라게 되어 빈자리인 정공을 형성하게 된다. 이러한 정공의 수는 실리콘에 첨가된 3가 불순물의 수에 비례하게 된다. 여기서 전류를 형성하는 대부분의 캐리어는 정공이므로, 도핑된 Si 또는 Ge은 양전하를 가진 입자의 전기적 성질 때문에 p형 반도체라 한다. p형 반도체에서 다수 캐리어는 정공이 된다. 비록 p형에서 다수의 전류입자가 정공이라 하여도 전자 또한 존재하게 되는데, 이들 전자는 전자-정공 쌍이 열에너지를 받아 발생될 때 생성된다. 이러한 전자들을 소수 캐리어라 하며, 도핑된 3가 불순물에 의해 만들어진 것은 아니다.

실리콘(Si), 게르마늄(Ge)을 1세대 반도체로 하고, GaAs, GaP, InP 등의 화합물반도체를 2세대로 하면, GaN을 중심으로 하는 III-V족의 WB(Wide Bandgap) 화합물반도체는 3세대로 분류될 정도로 중요한 위치를 차지한다. WB 화합물반도체는 에너지 밴드갭(energy bandgap)이 Si나 GaAs의 1.1 eV, 1.4 eV보다 높아 약 2 eV 이상의 큰 값을 갖는 반도체 재료를 뜻하며, 이 중에는 BN, AlN, GaN, InN 등이 있다. 이러한 WB 화합물반도체는 녹색-청색-자외선 광전소자에 이용될 수 있고, 또한 물리화학적으로 안정하므로 고온/고전력의 내환경 소자로서 활용할 수 있으며 응용분야는 매우 방대하다. 현재에는 청색발광다이오드, 청색레이저 다이오드, 자외선 수광다이오드, 고전력 고주파 증폭기 등의 소자가 이미 상용화되고 있다.

III-V족 WB 화합물반도체는 직접 천이형 에너지밴드 구조를 가지며 에너지갭이 1.9 eV(InN), 3.4 eV(GaN), 6.3 eV(AlN)로 넓어 주황색으로부터 자외선의 영역에 해당되는 광전소자의 제작에 가장 적절하다. 또한 고온/고전압에 안정한 물리적, 전기적 특성 및 압전 특성을 지니고 있다. 특

히 AlN 박막은 광자기 디스크의 자기층간 분리용 박막, X-band급의 고주파 음향소자 등에 사용되어 왔다. 최근 GaN/AlN/SiC 이나 AlN/SiC 과 같은 헤테로 구조에 관한 연구는 WB 화합물반도체의 실용화를 밝게 전망하고 있다. 질화물반도체인 AlN, GaN, InN는 원자결합에너지가 각각 2.88 eV, 2.2 eV, 1.93 eV으로 크기 때문에 용해 온도가 높다. 또한 GaAs의 6배 정도 되는 높은 열전도도 및 낮은 유전상수 등은 고온용 소자에 활용될 최적의 물성을 제공한다. 거기에다 화학적으로 매우 안정하여 HCl 이나 HNO<sub>3</sub>과 같은 강산에서도 거의 반응하지 않으므로 화학물질이 많은 극한환경에서 안정성을 확보할 수 있다. GaN계 화합물반도체의 직접 천이형 에너지밴드구조는 발광효율을 간접 천이형인 SiC보다 100-1000배 높게 하고, 원자결합에너지는 전위밀도가 10<sup>10</sup>cm<sup>-2</sup>로 높아도 발광소자의 수명이 길어 ZnS, ZnSe와 같은 II-VI족 화합물반도체 소자에 비해 안정하다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of several curved lines and dots, resembling an atomic structure or a network of connections.

KAERI

## 제2장 탄화규소 반도체 물질 특성

고온, 고압 및 고선량 환경에서 사용이 가능한 방사선 검출기 제작을 위해 사용된 4H-SiC 재료의 특성에 대해 논의한다. 먼저 4H-SiC 재료의 장점 및 특성을 기술함으로써 산업 및 의료 영상 분야에 대한 4H-SiC 재료의 적합성에 대해 기술할 것이다.

실리콘 소자의 물리적 한계를 극복한 전자 소자를 구현하기 위해 여러 가지 화합물 반도체가 연구되고 있으며, 차세대 반도체 소자 재료로서 SiC, GaN, AlN, ZnO 등의 광대역 반도체 재료가 많이 연구되고 있다. 이들 광대역 반도체 중 현재 단결정 ingot 성장 기술이 확보되어 기관으로서 생산 가능한 것은 탄화규소 재료 밖에 없다. 반도체 재료로서의 탄화규소는 우수한 물질 특성을 갖고 있는데 특히 절연과괴 전계가  $3 \times 10^6$  V/cm로 실리콘의 약 10배, 전자의 포화 속도가  $2 \times 10^7$  cm/s로 약 2배인 점은 고전압 전력 소자로서의 탄화규소 활용 가능성을 매우 높이고 있다. 1,500°C 이하에서는 열적 안정성이 우수하고 산화성 분위기에서의 안정성도 뛰어나며, 4.6 W/cm°C 정도의 큰 열전도도를 가지기 때문에 고온에서 장시간의 안정성이 요구되는 환경 하에서는 GaAs, GaN와 같은 III-V족 화합물 반도체나 다이아몬드보다 탄화규소의 응용이 한층 유용하다.[1]

탄화규소는 실리콘과 탄소가 1:1로 결합되어 있으며 기본 구조는  $sp^3$  혼성 궤도에 의한 사면체(tetrahedron)구조이다. 실리콘과 탄소는 80% 이상이 공유 결합을 하고 있으며, 나머지가 이온 결합을 하고 있다. 탄화규소는 동일한 화학 조성에서 다른 결정 구조를 갖는 다형성(polymorphism)을 가지며, 그 중에서도 한쪽 방향으로의 구조가 다른 다중구조형(polytypism)을 갖는 가장 대표적인 재료이다. 현재  $\beta$ -SiC 또는 3C-SiC로 불리는 하나의 입방정상과 70여종의 육방정상, 170여종의 능면정상이 보고되어 있다.

입방정상을 제외한 나머지는  $\alpha$ -SiC로 통칭된다. 이중 가장 많이 나타나는 상은 3C, 4H, 6H, 15R 등이며, 실제 응용에 있어 중요한 것은 3C-SiC, 6H-SiC, 4H-SiC 등 3가지이다. 각각의 결정형은 에너지 밴드

갭 및 전하 이동도 등이 달라 소자 응용에 있어 선택적으로 연구되고 있다.

탄화규소는 전자이동도가 실리콘에 비해 작으나, 밴드갭이 실리콘보다 2~3배 정도 크고, 동작 한계 온도가 650°C 정도로 실리콘의 200°C에 비해 훨씬 높으며, 화학 및 기계적으로 사용할 수 있는 소자를 제작할 수 있다. 이러한 반도체 물질의 본질적 물성 차이에 기인한 소자의 성능 한계는 JFOM, KFOM, BFOM, BHFFOM 등으로 표현되는 여러 가지 이득 지수(Figure Of Merit)를 비교해 보면 쉽게 알 수 있다.

높은 주파수와 대전력에 대한 응용의 이점을 나타내는 JFOM은 트랜지스터의 전력과 주파수의 한계를 항복전압과 포화전자 이동속도로부터 유도한 이득 지수로서 탄화규소가 실리콘에 비해 600배 이상이 높다. 이러한 물질 특성으로부터 탄화규소를 사용하여 고전압 전력 소자를 제작할 경우 상당한 장점을 기대할 수 있다. 탄화규소와 실리콘으로 각각 5,000V 급 수직 구조 MOSFET를 제작한다고 가정했을 때 SiC-MOSFET의 드리프트층의 두께가 약 1/10로 줄어들 수 있는데 이는 탄화규소가 실리콘에 비해 절연과괴 전계가 약 10배 가량 높기 때문이다. 또한 탄화규소의 경우 드리프트층의 농도가 실리콘 소자보다 약  $10^2$ 배 높아 결과적으로 열저항으로부터 환산된 전압강하가 실리콘 소자의 약 200분의 1로 감소할 수 있다. 이는 전압 저지 능력이 뛰어나면서도 통전 손실이 작은 고전압 소자를 탄화규소에서 구현할 수 있다는 것을 의미한다.

4H-SiC 물질의 경우 6H-SiC, 3C-SiC와 상대적으로 비교했을 때 밴드갭 에너지가 크고 전자의 이동 속도가 빠르기 때문에 상업적으로 더 많이 이용된다.

SiC는 동일한 4족 원소의 Si과 C의 화합물인 한편 이온성을 가지는 (Stoichiometric compound) 100가지가 넘는 결정형(polytypes)이 있는 점이 특징으로 꼽히고 있다. Figure 1에 주요한 몇 가지의 결정형을 나타내었다. 입방형(cubic), 육방형(hexagonal), 능면형(rhombohedral)과 같이 결정구조가 다를 뿐만이 아니라 동일한 결정 구조에서도 적층 주기가 달라 명칭이 달라지는데 명칭의 앞머리의 숫자는 적층 주기를, 뒷부분의 문자는 결정구조(C는 입방정, H는 육방정, R은 능면형)를 의미한다. 입방정

의 경우는 3C 한 가지만 존재하며 일반적으로 베타형 SiC로 부르고 그 나머지 결정형은 모두 알파형 SiC로 통칭된다.

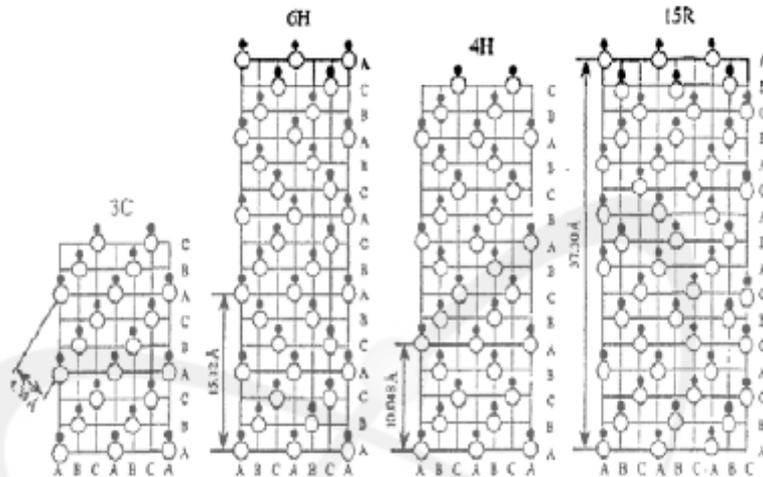


Figure 1. SiC의 원자배치도

이러한 SiC는 천연으로는 운석 중에 다소 관찰되지만 큰 결정으로는 존재하지 않는다. 그러나 연구 상으로는 19세기 초에 최초로 존재가 알려져 역사상으로도 오래된 반도체의 하나인 썸이다. 현재 Si를 주축으로 하는 반도체 전자산업은 그 응용범위가 상당히 넓지만 지금보다 사용 환경이 더 열악한 조건의 예를 들면 고온에서 사용하는 경우에는 사용에 제약이 있다. 반도체 소자의 온도를 상승시키는 것은 외부로부터의 열뿐만이 아니라 반도체 자신이 내는 열이 더 큰 문제로 대두되고 있다.

현재 대전력의 장거리 송신, 고속철도에서 전기자동차나 에어컨, 인버터의 제어에 이르기까지 실리콘 소자가 사용되고 있다. 이러한 전력전자분야에서는 대전류, 고내압화의 필요성과 함께, 고속화, 저손실화, 소형화가 요구되고 있다. 그러나 소자의 내전압을 크게 하면 열저항이 커지게 되어 소자의 발열량이 커지는 문제에 직면해 있다. 이러한 특징은 주로 소자 제조에 사용된 Si의 물성에 기인한 것이다. 만일 Si보다 뛰어난 물성을 가진 반도체 재료를 이용하면 이러한 한계를 깰 수 있고, 보다 가혹한 환경에서 작동할 수 있는 소자의 실현이 가능할 것이다. 이와 같은 요구에 부

응하여, Si에 비해서 밴드갭, 절연 파괴전압, 캐리어의 포화 드리프트 속도, 열전도도 등의 물성 값이 큰 SiC, 다이아몬드, 질화물 등의 wide-bandgap 물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

반도체 소자의 온도가 올라가면 역 바이어스 p-n접합에서 누설전류 (leakage current)에 의한 발생손실이 증대한다. 더욱더 고온이 되면 반도체의 밴드갭을 열적으로 뛰어넘어 생성된 캐리어가 증가하여 그것이 불순물 농도를 넘어서게 되면 소자로서의 동작특성을 상실하게 된다. 밴드갭의 크기에 따라 반도체가 이러한 형태로 되는 온도가 Figure 2에 나타나 있다. Figure 2에 나타낸 것처럼 반도체의 밴드갭이 크면 상대적으로 높은 온도 영역에서도 반도체 특성을 유지하게 된다. 따라서 SiC가 Si보다 에너지 밴드갭이 약 3배 정도 크기 때문에 Si 소자의 최대 동작온도인 250°C보다는 훨씬 높은 온도인 300 ~ 500°C까지 에서도 사용이 가능한 소자를 실현시킬 수 있다. 따라서 기존의 Si 소자의 경우, 예를 들면 자동차 엔진 근처에 적용할 때, 위치에 세심한 주의를 기울여야 하지만 SiC 소자의 경우 그럴 필요가 없어지게 된다. 또한 전력소자의 발열에 따른 냉각 시스템을 간단히 할 수 있어서 전체적인 시스템의 소형, 경량화 및 고효율화를 이룰 수 있다. 이것은 전력 시스템, 항공기, 자동차, 위성 시스템, 통신 및 레이더 등의 성능향상에 매우 유리한 점이 된다.

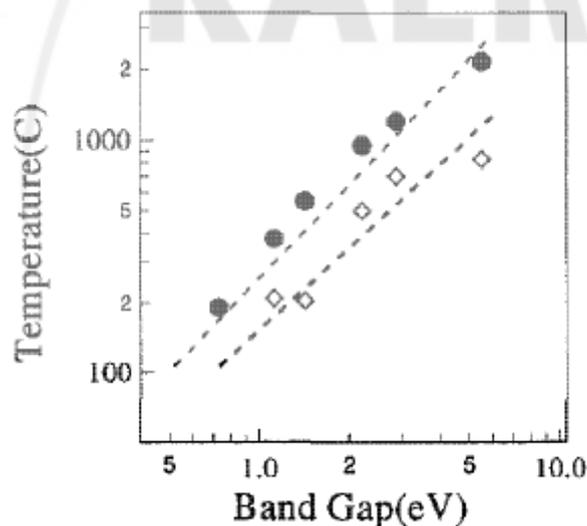


Figure 2. 여러 반도체의 밴드갭 에너지

일반적으로 소자가 직접적으로 고온 환경에서 동작이 가능하면 좀 더 신뢰성 있고 정확한 측정 및 제어가 가능할 뿐만 아니라 시스템의 소형 및 경량화 실현, 빠른 응답특성, 결과적인 효율향상 등 여러 가지 장점을 얻을 수 있다. Figure 3에 고온 환경에 적용되는 반도체 소자의 응용분야 및 온도영역을 나타냈다. 현재는 250℃까지의 온도 영역에서는 Si SOI 소자가 주로 사용되고 있다. 그러나 300℃를 넘는 온도 영역에서는 Si 소재로는 한계가 있고, 특히 SOI는 전력소자에 적용하기는 적합하지 않으므로 주로 저전력 고온소자가 필요한 부분에 적용되고 있다. 현재의 추세로 보아 200 ~ 300℃ 영역의 응용 분야에서는 SOI와 SiC가 함께 적용될 것으로 예상되며, 300℃를 넘는 온도영역에서는 앞으로 SiC 소자의 적용이 예상된다. 항공분야에서 엔진부근에 300 ~ 600℃에서 동작하는 소자와 센서는 종래의 유압방식의 제어에서 지능형 제어로 변환이 가능하여 기내의 배선과 접속을 90%이상 줄일 수 있다. 미국 공군에서 추정하기로 F-16 전투기에 SiC 소자를 사용하는 경우 800파운드의 기체무게를 줄일 수 있고 연비향상, 안정도 향상, 수명증가, 유지보수의 용이성으로 대당 백만 달러를 절약하는 것으로 보고되고 있으며, 우주선의 경우 SiC 소자의 내방사선 특성과 시스템의 부피와 무게를 줄여 궤도에 진입하는 무게 당 비용을 절약할 수 있다.

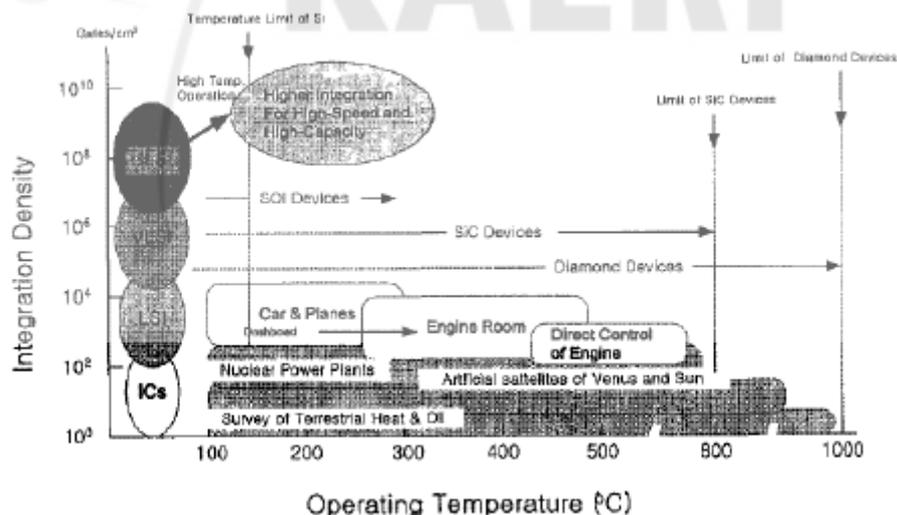


Figure 3. 고온환경에 적용되는 반도체 소자의 응용분야

상온에서 구조에 따라 2.4 ~ 3.1 eV의 밴드갭을 갖는 SiC는 UV 파장과 고에너지 입자의 검출에 적합하다. SiC의 결정성에 가장 나쁜 영향을 끼치는 것은 잘 알려진 micropipe이지만, 이와 관련하여 최근 수년간 결정성이 크게 진보하였다. 이 재료는 고온과 같은 극한환경에서 사용될 수 있고, 상업적으로 이미 UV-C 범위에서 작동하는 화염 검출기에 쓰이고 있다.



## 제3장 탄화규소 반도체 센서 및 방사선 반응

### 1절 SiC 에피층 성장 공정

SiC의 경우 1기압, 1410°C에서 congruent melting을 하기 때문에 액상에서의 안정적인 단결정 성장이 용이하며, 우수한 결정성과 단결정 성장 속도를 가진다. 이에 비해 SiC는 1기압에서 포정(peritectic)반응을 하기 때문에 액상 성장 방법에 의한 화학 양론적인 결정성장이 매우 어렵다.

화학 양론적인 용액으로부터 SiC 단결정을 성장시키기 위해서는 열역학적으로 다이아몬드 합성과 비슷한 100,000기압 이상의 압력과 3200°C 이상의 온도가 필요하나 이러한 열역학적인 조건을 유지하는 것 자체가 매우 비경제적이기 때문에 이러한 접근방법 또한 비현실적이다. 따라서 탄화규소 단결정 성장은 기상에서 고체상으로의 상전이(승화)를 주로 이용하고 있다. 승화현상을 단결정 성장에 이용하기 위해서는 인위적인 SiC 기상의 과포화도의 유지와 지속적인 기상의 공급이 필요하다. 이러한 기상의 이동이 단결정 성장의 본질적 과정이기 때문에 승화를 이용한 모든 결정 성장 방법을 PVT(Physical vapor transport)라 한다.

PVT는 도가니의 고온부분에서 SiC 원료물질의 승화와 승화된 원료물질이 온도구배를 따라 저온부분으로 이동하는 두 과정으로 이루어진다. 반응실 내에 존재하는 과포화도가 단결정 성장의 열역학적 구동력이 되며, 과포화된 기상의 분자가 상대적으로 낮은 온도를 유지하는 표면에 증착하면서 단결정 SiC가 성장한다. 증착되는 표면에 인위적으로 종자정을 놓는 경우가 대부분이나 그렇지 않는 경우도 있다. 원료 물질로는 SiC 분말, 기계적으로 혼합된 실리콘과 탄소의 분말 혹은 결정질 SiC가 이용된다. 기상의 수송은 진공이거나 아르곤과 같은 가스 분위기에서 행하여진다. 단결정 성장이 되는 전형적인 온도와 압력의 범위는 각각 1600 ~ 1700°C, 10 ~ 20 torr이다. 일반적으로 벌크 SiC 성장은 고온에서 이루어지지만 epitaxial SiC 성장은 이보다 낮은 온도에서 이루어진다.

SiC 단결정을 성장시키는 방법의 하나로 chemical vapor deposition(CVD)법이 있다. CVD법은 고순도의 crystal을 성장시킬 수 있고, 동시에 불순물의 농도를 제어하여 doping level을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다. CVD법은 주로 SiC 박막을 증착하는데 이용되고 있으며, 이 방법을 이용할 경우 bulk growth와 기존의 epitaxial growth를 같이 진행할 수 있는 이점이 있다. 일반적인 CVD법은 1500 ~ 1600°C의 증착 온도에서 약 2 ~ 3 $\mu$ m의 증착 속도를 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 high-voltage power device를 제조하기 위해서는 증착 속도의 향상이 필요하며 이를 위하여 high temperature chemical vapor deposition(HTCVD)법이 이용되고 있다.

Melt solution을 이용하여 단결정을 성장시키는 방법은 많은 반도체 물질에서 널리 사용되고 있다. 하지만 Si melt에 대한 SiC의 solubility가 작고 parasitic phase의 생성에 의한 불순물의 첨가 때문에 SiC 단결정 성장에서는 liquid phase growth가 제약을 받아왔다. 실제로 solution으로부터 단결정을 성장시킬 때는 몇 가지 어려움이 있다.

최근 전 세계적인 유가급등, 자원고갈과 지구온난화의 위협 등으로 에너지 소비의 고효율화가 매우 중요한 국제적인 사회적 이슈로 대두되고 있다. 산업혁명 이후 높은 에너지 소비를 바탕으로 높은 삶의 질을 추구하여 왔으나, 한편 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 과다 배출로 인한 지구 온난화라는 문제가 야기되었기 때문이다. 따라서 에너지 절감과 에너지 효율의 향상이 글로벌한 큰 관심을 받게 되었고, 이를 실현시키기 위한 연구가 산업체 전반에서 일어나고 있다. 특히, 전압·전류를 시스템에서 요구하는 적합한 형태와 크기로 변환하는 전력용 반도체에서도 에너지 효율이 뛰어난 반도체를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행이 되고 있다.

미국의 경우, 전체 전력소비량 가운데 냉난방을 포함한 모터제어 관련 분야가 60% 가량을 차지하고 있는데, 생산 용량 측면에서 보면 전체 전력 생산용량의 77%가 화석연료에 기반하고 있다. 또한 국내의 경우 총 전력 생산량 403GWh 가운데, 화석연료를 사용하는 평균 전력생산량은 60% 이상을 차지하는 상황이다.

이러한 화석연료로 인해 지구온난화의 주범인 이산화탄소 배출량의

40%가 전력생산에 기인하고 있다는 점을 고려하면 에너지의 효율적인 이용이 시급하다. 이러한 에너지의 효율적인 이용을 위해서는 전력변환기술, 특히 전력변환용 반도체소자의 고효율화 및 고신뢰성을 확보하는 것이 매우 중요한 상황이다.

실리콘 카바이드 (SiC, 탄화규소) 전력반도체 소자는 기존의 실리콘 기반의 전력반도체 소자의 한계를 극복하여 전력변환기술의 고효율화를 달성하기 위한 대안으로 주목을 받아왔고, 특히 최근 웨이퍼 기술 수준의 향상과 함께, 전술한 최근 글로벌 에너지 정책에 따라 더욱 급부상하고 있다.

스웨덴의 Berzelius가 최초로 SiC 원소 재료를 실험적으로 합성할 당시인 1820년대는 Si 역시 최초로 합성이 보고되었던 시기였으며, 반도체 소자가 최초로 개발된 당시에서도 SiC는 이미 반도체 재료로서 인식되고 있었다. 이러한 SiC의 우수한 물성은 이미 꽤 오랫동안 잘 알려져 있었으나, 1950년대 이후에야 실질적인 SiC 박막성장 기술이 발전되었고, 1978년 seeded sublimation 기법에 의한 고순도 SiC wafer의 제작이 보고되었다.

많은 반도체 재료가 용해(melt)되는 특성을 이용하여, Si 양산에 기본적으로 이용되는 개념인 초크랄스키 법(Czochralski method)과 같이, 모결정(seed crystal)으로 부터 크게 확대된 단결정 벌크 웨이퍼를 양산할 수 있다. 그러나 이와 달리, SiC는 실질적으로 가능한 온도-압력 조건에서 용해시키는 공정이 불가능하며 따라서 용해 대신 승화(sublime)시키는 방법이 사용될 수밖에 없다.

이와 같은 난점으로 인하여 대량생산에 적합한 SiC 웨이퍼 생산이 용이하지 않았다. 초기 SiC 전자소자는 약  $1\text{cm}^2$  크기의 기판에 제작되고 있었다. Acheson법을 사용하여 주로 산업용 연마제 등을 타겟으로 한 공정으로 SiC 벌크재료가 합성되던 상황에서 Lely법에 기반을 두어, 약  $2,500^\circ\text{C}$ 에서 SiC 다결정 분말로부터 승화시켜 SiC bulk 재료를 얻는 과정을 이용하며 발전하였으나, 역시 전자소자용 웨이퍼의 대량생산과는 거리가 있는 상황이었다. 1989년 미국 Cree社가 고순도 에피기술을 보고했고, 이를 계기로 지속적인 연구가 가속화되었고 1994년 step-controlled

epitaxy기법의 개발로 저온에서 고품질의 박막 형성이 가능하게 되었으며, 최근에 4인치 웨이퍼가 공급되는 단계의 기술 수준에 이르렀다.

수백여 종의 polytype을 갖는 것으로 알려진 SiC는, 실리콘보다 대략 3배 정도 높은 에너지 밴드갭을 가지며, 정방형(cubic)의 3C 구조와 정육방형(hexagonal)의 4H, 6H의 구조가 가장 대표적인 polytype이다. 특히 전력소자용으로 가장 적합한 4H-SiC의 경우  $\sim 3.26\text{eV}$ 의 에너지 밴드갭을 갖고 있고, 실리콘에 비해 10배 정도( $>2 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ) 큰 임계전계(electric breakdown field)를 지니는데 이런 특성은 차단(blocking)시에 동일한 전압을 인가한 실리콘 소자보다 공핍되는 드리프트 영역을 1/10배로 감소시킨다.

또한 4H-SiC의 열전도율은 실리콘의 열전도율에 비해 약 3배 높다. 이와 함께 큰 밴드에 기인한 높은 진성반도체 온도로 인하여 SiC 소자는 실리콘 소자와 비교하여 더욱 높은 온도에서 안정적으로 동작 할 수 있다. 그리고 SiC 소자에서는 드리프트 영역의 도펀트(dopants)의 농도를 실리콘 소자의 유효농도의 농도에 비해서 100배 정도 높일 수 있다. 높은 항복전압을 갖는 파워 소자의 경우, 열저항은 대부분이 드리프트 영역의 열저항에 의해 결정되게 되므로, 동일한 항복전압을 갖는 실리콘 소자 열저항의 1000분의 1 정도까지 줄일 수 있으며, 포화 드리프트 속도(saturated electron drift velocity)는 실리콘의 경우에 비해 약 2배 이상이므로, 실리콘 소자에 비해 빠르게 동작 할 수 있는 장점이 있다.

최근 4인치 크기까지 생산을 하고 있는 SiC 웨이퍼는 미국 Cree社의 독주 체제에 몇몇 유럽과 일본 업체가 시장에 진입하며 본격적인 가격경쟁 및 저가화가 시작되었다. SiC의 가장 이슈가 되는 결함(defect)이 바로 micropipe이며, 많은 상업용 양산 웨이퍼들이 이 specification을 기준으로 분류되고 있다. micropipe은 열역학적으로 안정한 속이 빈 screw dislocation로, 약  $1\mu\text{m}$  크기의 구멍이 웨이퍼의 표면으로부터 뒷면 바닥을 관통하는 형태로 보통 웨이퍼의 c축을 기준으로 약  $\pm 15^\circ$ 의 off-angle을 갖게 된다. micropipe 결함이 소자의 활성영역에 위치하는 경우, 임계전계가 줄어드는 영향이 있으므로 소자에 미치는 영향이 크나, 상업용 웨이퍼에서의 micropipe 결함은 현저히 감소 ( $< \sim \text{수/cm}^2$ )되었고, 대용량

소자기준으로 90% 이상의 수율이 확보된 상황이다.

이미 다이오드, MOSFET, BJT, IGBT등의 구조는 전력공학 분야에서 중요한 역할을 하고 있으나, 실리콘의 경우 구조적인 개선을 통한 성능 개선은 한계점에 이르고 있다. SiC는 이러한 실리콘 소자들의 한계를 뛰어넘을 수 있는 혁신적인 물성을 가지고 있으므로, 성능 측면에서 뿐만 아니라 전력변환장비의 크기를 획기적으로 줄일 수 있다. SiC 반도체 분야에서의 최근의 비약적인 발전을 통해 고전압 전력소자로서의 활용가능성이 매우 높아지고 있다. 특히 소자가 직접적으로 고온 환경에서 동작이 가능하면, 좀 더 신뢰성 있는 정확한 측정 및 제어가 가능할 뿐만 아니라 시스템의 소형 및 경량화 실현, 빠른 응답특성, 결과적인 효율향상 등 여러 가지 장점을 얻을 수 있다.

SiC의 경우도, Si과 마찬가지로, 개략적으로 단극성 다수 캐리어 타입(Unipolar) 소자와 양극성 소수 캐리어 타입 소자(Bipolar)로 분류가 가능하다. 전자의 경우 on 상태에서의 드리프트 전류에 의존하고, 후자의 경우 스위칭 손실이 높을 수도 있으나 고전류에서 상대적으로 낮은 순방향 전압강하를 가져오게 설계가 가능하다.

이미 수kV 급의 SiC 쇼트키 다이오드가 상용화 되었고, Si과 같은 SiO<sub>2</sub>를 성장시킬 수 있어 다양한 구조의 MOSFET에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. SiC는 열전전도가 높기 때문에 소자에서 발생하는 열을 추가적인 방열 구조 없이 방출할 수 있는 큰 장점이 있다. Figure 4는 SiC를 기반으로 제작한 소자들의 열저항과 항복전압의 특성을 보여준다. Figure 4에서 보듯이 기존 Si 기반 소자의 한계를 넘어서는 SiC 기반 소자들이 연구 보고되었다. 전술한 바와 같이 현재로서는 세계적으로 SiC 웨이퍼를 제조할 수 있는 연구소나 회사는 비교적 소수이기 때문에 공급 가격 등의 문제가 있는 상황이나, 앞으로 개선될 것으로 기대되고 있다. MOSFET의 SiC 채널과 SiO<sub>2</sub>의 계면 문제는 신뢰도 면에서 신속히 해결해야 할 문제점이다. 계면상태와 결합으로 생성되는 문제로서, 전자이동도가 저하되고, 온도에 따른 문턱전압의 변화가 발생하게 된다. 그러나 이러한 웨이퍼 문제와 신뢰도 문제는 지속적인 연구와 개발로 개선되어 질 가능성이 높다고 볼때 SiC를 기반으로 한 고전압 소자개발은 희망적이다.

최근 들어 MOSFET이 가지는 이러한 계면 문제를 줄일 수 있는 JFET 계열의 소자나 BJT에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 전통적인 구조의 JFET소자는 normally-on 특성이라는 단점이 있으며, normally-off로 제작할 경우 열저항이 높아지게 되고 게이트 구동 전압범위가 자유롭지 못하다는 측면이 있다. 이를 해결한다면 조만간 이상적인 JFET 전력 소자를 생산할 수 있을 것이다. FET를 포함한 생성과 재결합을 위한 시간이 필요하지 않은 단극성 SiC 소자들은 600 ~ 3300V의 전압 등급에서 양극성 Si 소자들을 대체할 것으로 기대되고 있다. SiC unipolar 소자는 스위칭 주파수를 매우 증가시킬 수 있고, 시스템적인 측면에서도 증가된 스위칭 주파수는 유지하면서도 수동소자의 크기가 적어진다는 장점이 있다. 나아가 매우 낮은 스위칭 손실특징은 효율이 중시되는 여러 응용분야에서의 핵심문제인 에너지 절약과 관련된다. 그리고 이러한 효율적인 스위칭 손실의 장점 외에도 패키징 된 SiC 소자는 더 높은 접합 온도에서 동작될 수 있다는 장점이 있다. 특히, 예를 들어 자동차용 DC 컨버터는 LC 구성 요소에서의 크기와 무게의 감소 면에서, 나아가 추가적인 냉각회로 역시 생략되어 질 수 있으므로, SiC로 부터 큰 이익을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

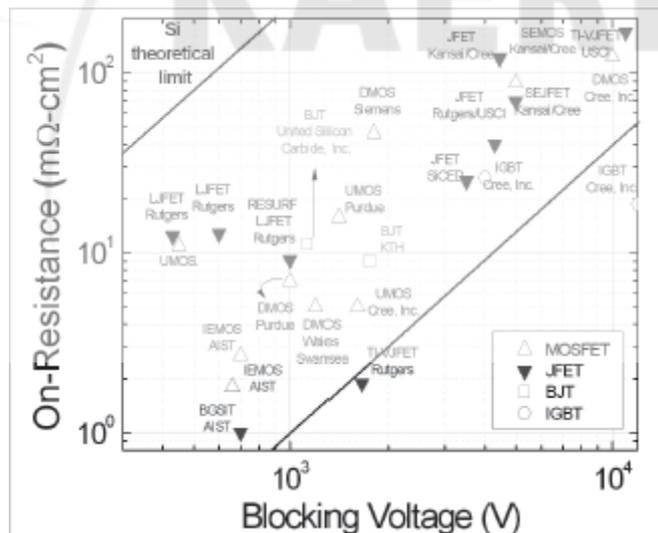


Figure 4. 최근 보도된 SiC의 열저항과 항복 전압

## 2절 SiC 반도체 센서

SiC의 Schottky barrier height는 강한 Fermi-level pinning없이 금속의 일함수에 의존한다. 일반적으로 SiC에서 Schottky diode는 1 보다 큰 ideality factor를 보이며 이 값이 온도에 따라 크게 감소하는 경향을 가진다. 또, 이론으로 기대된 것 보다 높은 역방향 전류(reverse current)를 가진다. 이러한 실험적인 결과는 Schottky 장벽이 공간적으로 불균일하게 분포하고 있다는 것을 가정하여 설명할 수 있다.

SiC 계열 p-n 접합 광다이오드는 가장 먼저 시장에 나온 WBG 검출기였고, 화재경보, 방전 검출과 연소장치의 감시 등에 적용되고 있다. UV 검출을 위한 SiC 광다이오드의 이점은 역방향 전류가  $10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup> (at -1.0 V bias, T =493K) 정도로 매우 낮다는 것이다. 일반적인 최대 반응도는 270 nm에서 150 ~ 175 mA/W 정도이며 환산한 양자효율은 70 ~ 85 %이다. 또 동작온도가 상승할 때 반응도의 최대값이 장파장으로 이동하며 장파장 영역에서 반응도가 상승하는 모습을 보인다. 이것은 온도에 따라 운반자의 확산 길이가 달라지기 때문에 나타나는 결과이다.

CCD는 Charge Coupled Device의 약자로서 전자공학에서는 전하 전송 소자라고 일컬어지고 있다. 처음에 이를 고안한 사람은 벨 연구소의 스미스인데, 이후 여러 가지 형태로 개선되어 오늘날 영상처리 및 광센서 등의 분야에서 많이 사용되고 있는 중요한 소자가 되었다. CCD는 반도체 표면 위에 세밀하게 간격을 조절하여 만든 MOS 구조의 array이다. MOS 소자에 전압을 인가하면 전극 하부의 반도체에 전하 결핍 (charge depletion) 영역이 만들어지고 따라서 국부적인 전위 우물이 형성된다. 이 상태에서 외부에서 빛이 들어오면 전자-정공 쌍이 생성되며 소수 캐리어는 전위 우물에 갇히게 된다. 이리하여 charge packet을 전위 우물 내에 국한시킬 수 있고 array 형태의 gate에 순차적으로 전압을 인가하여 전위 우물에 갇힌 charge packet을 이동시켜 원하는 전극으로 뽑아낼 수 있게 된다. SiC는 SiO<sub>2</sub>라는 안정적인 자연 산화막을 이용할 수 있다는 장점을 가진다. 1996년 Sheppard 등은 6H-SiC를 이용하여 CCD를 제작하였고

99.4%의 전하운송 효율을 가진다고 보고하였다.

SiC는 매우 우수한 radiation hardness를 가지기 때문에 고에너지 입자 검출에 적합한 재료이다. SiC Schottky diode를 이용하여 열중성자를 검출하는데 있어서 flux가  $10^4 \sim 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 영역에서 반응도가 직선적임이 보고된 바 있다. 알파 입자를 검출하는데 있어서 에너지 반폭치 분해능은 Schottky diode에서 5.8% (294 keV)이고, p-n junction diode에서는 6.6% (260 keV)이었다. 또한, 200 °C 이하의 온도에서는 반응도가 온도에 의존하지 않음이 확인되었다.

Figure 5는 현재 상업적으로 이용되고 있는 이온화 검출기 중 Si, CdTe, CdZnTe, GaAs, SiC 물질을 이용한 검출기의 전기장에 대한 누설 전류 밀도를 보여준다. 4H-SiC 검출기는 100°C가 넘는 주변 환경에서 적은 노이즈를 가지면서 동작한다는 것을 알 수 있다. 4H-SiC 검출기가 100°C가 넘는 환경에서 x-ray와 알파 입자를 검출을 위한 다양한 형태로 이용된다는 것은 실험적으로 증명되었다.[3]

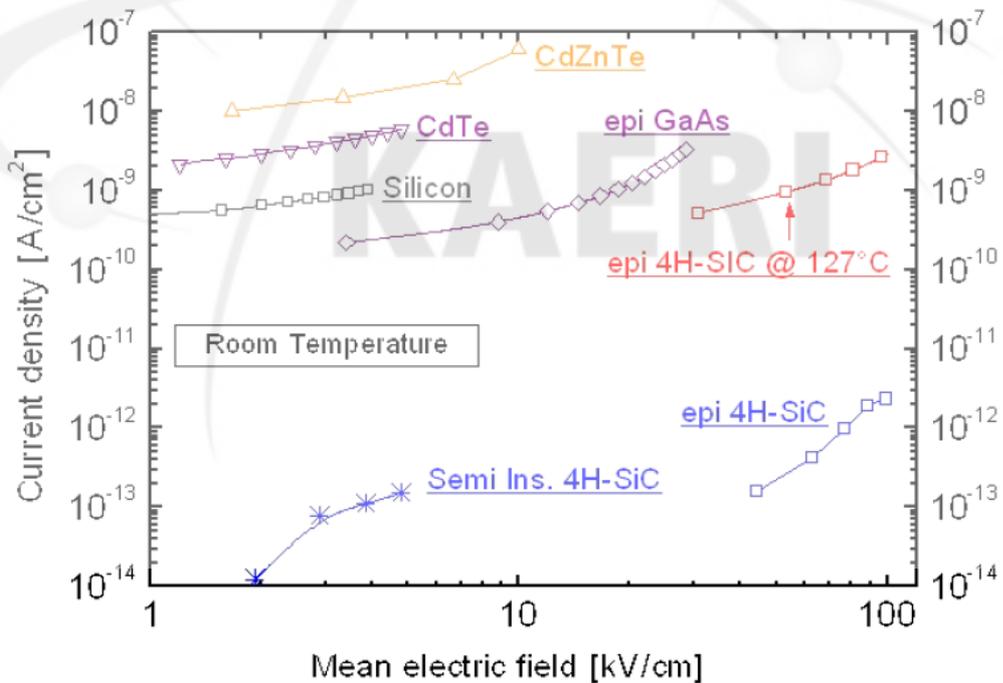
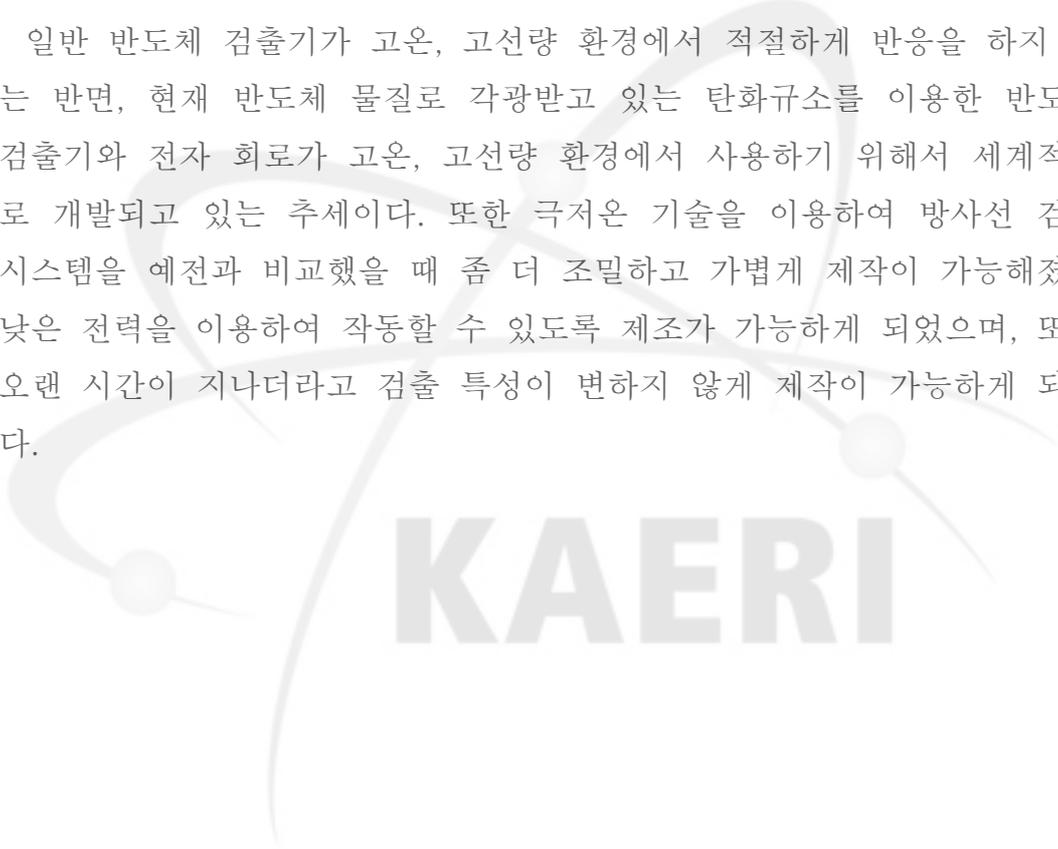


Figure 5. The current density as a function of the mean electric field acquired with diodes realized on materials employed in most commercial radiation detectors.

최근에, X-ray, 감마선, 비하전입자, 하전입자들과 같은 저·고에너지를 가지는 방사선을 에너지 분해능이 높은 이미지로 변환할 수 있는 기술이 많은 부분에서 향상이 되었다. 이미지 변환 기술의 향상은 고온·고압을 가지는 극환경, 국가 안보 및 조약 검증, 환경 보전, 천문학 분야 그리고 기초과학과 같은 여러 분야를 포함하는 산업 분야와 의료 영상 분야에 국한되지 않고 넓은 범위에 걸쳐 중요한 의미를 지닌다. 전기적인 신호처리 시스템과 더불어 실험실에서의 프로토타입(prototype) 개발로 인해 반도체 물질의 결정체 품질과 장치 제작 기술이 현저한 발전을 해왔다.

일반 반도체 검출기가 고온, 고선량 환경에서 적절하게 반응을 하지 않는 반면, 현재 반도체 물질로 각광받고 있는 탄화규소를 이용한 반도체 검출기와 전자 회로가 고온, 고선량 환경에서 사용하기 위해서 세계적으로 개발되고 있는 추세이다. 또한 극저온 기술을 이용하여 방사선 검출 시스템을 예전과 비교했을 때 좀 더 조밀하고 가볍게 제작이 가능해졌고 낮은 전력을 이용하여 작동할 수 있도록 제조가 가능하게 되었으며, 또한 오랜 시간이 지나더라도 검출 특성이 변하지 않게 제작이 가능하게 되었다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of several curved lines and dots, resembling a particle detector or a network of connections. The entire logo is rendered in a light gray color.

KAERI

### 3절 SiC 반도체 방사선 센서

알파, 베타 입자와 같은 하전 입자는 자신들이 가지고 있는 전하와 원자 내 궤도 전자의 음전하 사이에서 작용하는 쿨롱 힘에 의해서 1차적으로 상호 작용한다. 상호 작용 시에, 전자는 입자가 전자의 주변을 지나갈 때 쿨롱 힘으로부터 충격을 받게 된다. 이 충격으로 인해 전자는 원자의 궤도로부터 완전히 벗어날 수 있는데, 이 과정이 검출기 동작의 이상적인 과정이다. 전자로부터 전달받는 에너지는 전체 에너지에서 적은 부분을 차지하는 에너지이기 때문에, 입자는 검출기 내로 들어가는 경로를 따라 가지고 있던 많은 에너지를 상호 작용을 통해 잃게 된다. 따라서 이 과정을 통해 입자는 속도가 감소하면서 많은 전자-정공쌍을 형성하게 된다. [1]

X-ray와 감마선과 같은 방사선은 탄성충돌(elastic scattering), 광전흡수(photoelectric absorption), 콤프턴 산란(compton scattering), 쌍생성(pair production)과 같은 4가지 방법으로 물질과 상호 작용할 수 있다. 대부분의 경우에, 광전흡수 반응이 검출기 동작에 있어서 이상적인 반응이라고 할 수 있다. 이 반응에서는 검출기로 입사하는 광자가 검출기 내에 존재하는 원자의 하나의 궤도 전자에 모든 에너지를 전달하게 된다. 에너지를 전달받은 이 광전자는 상호 작용을 통해 많은 전자-정공쌍을 생성하면서 전달받은 에너지를 잃게 된다. [1,2]

중성자가 원자와 상호 작용을 하는 경우에는, 중성자가 원자와 반응을 하여 에너지를 가지는 알파 입자, 양성자 등과 같은 하전입자를 생성하는 핵반응을 한다. 실제로 모든 유형의 중성자 검출기는 앞서 언급한 하전 입자를 검출하는 기존의 방사선 검출기 원리와 동일하게 중성자가 원자와 반응을 하여 원자에 흡수된다. 자세한 중성자 검출 과정에 대해서는 참고 문헌 [1]에 기술되어 있다.

방사선에 의해 생성되는 많은 전자, 정공은 검출기에 인가된 전압에 의해 형성되는 전기장에 의해서 분리되고, 이들 각각은 양극과 음극으로 이동하여 전류 펄스를 형성하게 된다. 전류 펄스를 확인하기 위해 검출기

외부에 전자 회로를 구성하여 펄스 스펙트럼을 얻을 수 있다. 단일에너지  
를 가지는 방사선의 경우에는 카운트 수가 최대인 곳을 중심으로 분포되  
어 있다. 일반적으로 펄스 스펙트럼을 통해서 검출기를 평가하는데 중요  
한 특성인 전하 수집 효율과 에너지 분해능을 알 수 있다. [1]

반도체 검출기를 제작할 때 사용되는 반도체 물질을 선정할 때에는 에  
너지 분해능, 검출 효율과 같은 특성들을 고려해야 하며, 고온·고선량 환  
경에서 작동이 가능한지를 생각해야 한다.

(1) 검출기가 동작하는 동안 전기장이 있는 환경에서 누설 전류를 작게  
하기 위해서는 반도체 물질의 밴드갭 에너지가 커야한다. 낮은 에너지를  
가지는 방사선의 에너지 분해능이 좋은 검출기를 제작하기 위해서는 누설  
전류가 적어야 한다.

(2) 이온화 방사선에 의해 많은 전자-정공쌍을 생성하기 위해 전자-정  
공쌍 생성 에너지가 작아야 한다. 전자-정공쌍 생성 에너지는 반도체 물  
질의 밴드갭 에너지와 비례하기 때문에 중요하다.

### (3) 유전율

반도체 물질의 유전율이 작으면 더 낮은 전기용량으로 검출기를 동작시  
킬 수 있다.

### (4) 고순도, Homogeneous, 단결정, 결함이 없는 물질

반도체 물질의 결함 밀도가 낮으면, 전하 수집율이 높아지고 누설 전류  
가 적게 흐르며 에너지 분해능이 좋아진다. 단결정은 경계면의 그레인 효  
과와 다른 결함들을 최소화할 수 있다.

### (5) High intrinsic mean drift length

전하 캐리어의 평균 이동 거리  $\lambda = (v_d \cdot \tau)$ 로 나타낼 수 있으며,  $v_d$ 는  
캐리어 속도,  $\tau$ 는 캐리어 수명을 의미한다. 평균 이동 거리  $\lambda$ 는 캐리어가

트랩에 포획되기 전에 전기장에서 표류하는 거리의 평균값으로 구한다. 신호 형성에 영향을 미치는 캐리어의 평균 이동 거리  $\lambda$ 가 길다면 검출기의 전하 수집 효율이 상승하고 에너지 분해능이 좋아진다. 일반적으로 스펙트로미터가 배치되는 강한 전기장이 형성된 환경에서는  $\mu$ 가 일반적으로 낮은 전기장 조건에서 적합한 변수이고  $v_d$ 는 강한 전기장에서 잘 알려져 있기 때문에 평균 이동 거리  $\lambda$ 가  $(\mu \cdot \tau)$  값보다 더 큰 의미를 지닌다. 이 때  $\mu$ 는 캐리어 mobility를 나타낸다.[3, 4]

#### (6) High atomic displacement energy

방사선으로 인해 결정체 격자에 결함을 일으키는 방사선 데미지는 검출기에서 캐리어의 전하 수집을 방해하고 에너지 분해능을 나쁘게 만드는 역할을 한다. 게다가, 방사선 데미지는 상대적으로 베타 입자, X-ray, 감마선과 같은 방사선에는 영향을 적게 미치지만 중성자, 중하전입자에는 상당한 영향을 미친다. [5-10] 고에너지 입자의 입사로 인해 생성되는 주요 결함으로는 Vacancy (V), Interstitials (I), Frenkel pairs (V+I) 그리고 Antisites 4가지가 있다.[6] 이들 각각의 결함은 원자가 기존의 자기 자리를 벗어난 것으로부터 시작되는데, 원자 위치가 자신의 자리를 벗어나게 되면 결함을 발생시키는 주요 원인이 되는 원자가 운동할 수 있는 최소한의 운동에너지인  $E_d$ 가 물질의 방사선 데미지를 설명하는데 가장 중요한 요소가 된다. 다이아몬드 ( $E_d \approx 40$  eV), 탄화규소( $E_{dSi} = 35$  eV,  $E_{dC} = 22$ eV)[11-14] 와 같은 큰  $E_d$  값을 가지는 물질의 경우에는 원자가 운동을 하기 위한 에너지가 크기 때문에 방사선에 대한 강도가 강하다는 것으로 생각된다.

#### (7) 높은 열전도도

검출기의 방사선을 견디는 강도를 증가하는 방법으로는 검출기 자체를 냉각시키는 것인데, 이 때 검출기를 구성하는 물질들이 저온에서도 물질 특성이 좋아야 한다. 게다가, 물질의 열전도도가 높으면 전기적 장비들이 검출기 주변에 있거나 검출기와 연결이 되어있을 때, 동작 온도를 쉽게 조절할 수 있다.

위에서 요구되는 7가지의 물질 특성을 생각해본다면, 어떤 물질들은 이온화 방사선 검출기에 특히 적합하다는 것을 알 수 있다. 특히 탄화규소 즉, SiC는 큰 밴드갭 에너지를 가지는 반도체 사이에서 주목을 받고 있으며 최근에는 4H-SiC polytype의 광자, 하전입자 스펙트로미터가 고온·고선량 환경에서 좋은 분해능을 가진다는 점에서 개발되고 있는 실정이다.[15-18] 이런 반도체 특성들은 물질의 성장 기술 및 전기적 장비 제작 기술이 향상됨으로써 이루어질 수 있었고 많은 응용 분야에 제작된 장비들을 이용함으로써 반도체 물질 각각의 특성들을 최상으로 이끌 수 있었다.

반도체 검출기를 제작하는 공정은 다수의 중요한 단계를 포함하고 있다. 이런 단계들은 반도체 또는 반절연체 물질의 성장, 물질 표면의 절단 및 Polishing 작업, 전하 수집 과정에서 장벽을 없애는 전극의 배치 작업, 검출기 포장 작업 및 외부 전자 회로 접착, 연결 작업 등을 포함하고 있다.

재료를 성장시키기 위하여 몇 가지 기술들이 사용된다. 각각의 성장 기술에서 주요한 목적은 전하 수집 효율을 높이고 에너지 분해능을 좋게 하기 위해 물질의 결함을 최소화하는 것이다. 결함의 상태와 결함이 어떻게 진행되는지에 관해서 정확히 설명을 하는 것은 어렵지만, 본 보고서에서는 4H-SiC 물질을 이용할 때 검출 효율을 증가시키는 것을 방해하는 결함들에 대한 논의에 대해 기술하겠다.

일반적으로 반도체 검출기의 종류는 다양하지 않다. 검출기 동작 원리 및 부속품들의 배치를 보면 다음과 같이 4가지로 구분할 수 있다.

- (a) Single planar detector
- (b) Coplanar-grid detector
- (c) Microstrip detector
- (d) Pixellated detector

서로 다른 4가지 유형의 검출기들은 각각의 최적화된 환경에서 이용된다. 예를 들면, Microstrip, Pixellated 검출기의 경우에는 개별적으로 구

성되어 있는 스트립과 픽셀들로부터 신호를 얻어 위치에 관한 정보를 얻을 수 있다. 상대적으로 부피가 큰 co-planar grid-detector의 경우에는 일반적으로 에너지 분해능이 뛰어나기 때문에, 고에너지를 가지는 감마선 (i.e.  $> 200$  keV)을 측정하는데 주로 이용된다.

CCD와 Drift 검출기와 같은 형태를 띄는 반도체 검출기는 수준이 높은 마이크로 전자공학 기술이 요구되기 때문에, 단지 실리콘만 이용이 가능하다. 트랜지스터 구조를 가지는 다른 장비들도 최근에 단일 알파 입자 검출을 위해 제안되기도 하였다.[19]

검출기의 동작 특성에 중요한 역할을 하는 것은 검출기의 기하학적 구조와 펄스를 처리하는 방법 및 검출기에 배치되는 전극이다. 본 보고서에는 이런 기술적인 측면에 대한 것보다는 먼저 SiC 물질 특성과 금속/4H-SiC 쇼트기 장벽의 특성에 대해 논의하겠다.

SiC를 전자소자에 응용하기 위해서는 ohmic 접합과 schottky 접합을 형성하는 전극 물질의 개발이 우선되어야 한다. 또한 탄화규소의 전기적, 열적, 기계적 안정성을 이용하여 고온, 고주파, 고출력용 전자소자를 제조하기 위해서는 전극의 고온 안정성이 필수적이며, SiC 소자의 응용 범위는 전극에 의해 제한된다고 할 수 있다.

Ohmic 접합은 소자의 동작 주파수, 잡음 특성 및 출력에 큰 영향을 미친다. 또한 접촉 저항이 클 경우 열방출이 증가하여 소자의 온도가 증가하므로 접촉의 고온 안정성과 낮은 접촉 저항이 필수적으로 요구된다. 지금까지 많은 연구 결과가 보고되고 있지만 대부분의 경우 ohmic 접합을 형성하기 위해서는  $800^{\circ}\text{C}$  이상의 높은 열처리 온도를 필요로 하기 때문에 반도체 공정에 이용하기 위해서는 더 많은 연구가 진행되어야 할 것이다. 현재 n형 SiC에는 Ti, Ni, W 등이 연구되고 있으며 p형에는 Pt, W, Ti 등이 ohmic 접합을 이루는 것으로 보고되고 있다.

Schottky 접합은 다이오드와 같은 고온용 또는 고전압 소자 뿐만 아니라 MESFET과 같은 고주파 전력소자에서도 중요한 역할을 한다. FET나 Schottky 다이오드를 고온에서 사용하기 위해서는 Schottky 에너지 장벽을 높이는 것이 필수적이며, 에너지 장벽의 높이는 Schottky-Mott 이론에 의하면 금속의 일함수에 의하여 결정된다. 하지만 실제로 에너지 장벽

은 SiC 박막의 표면준위, 결정다형, 금속 전극의 증착 방법 등에 영향을 받는다. 또한 열처리 조건에 따라서 접촉 특성이 변화하므로 열처리 조건을 최적화하는 것이 중요하다. 6H-SiC의 경우는 Schottky 접합의 특성이 많이 연구되었으며, n형 SiC에는 Al, Au, Ni, Pt 등이 연구되고 있고, p형에는 Al, Au, W 등이 Schottky 접합 물질로 보고되고 있다. 4H-SiC의 경우에는 n형외의 경우에만 Au, Ni, Pt 등에 대한 연구결과가 보고되고 있으며, p형에 대해서는 아직 연구가 미미한 실정이다.

위에서 언급된 다이오드는 Crystal Growth of Berlin (CREE)사 또는 LPE of Barabzate (Italy)에 의해서 제공받은 n형의 4H-SiC 에피층을 말한다. 이 때 도핑농도는 Cree사의 경우 ( $N_{\text{eff}} = N_D - N_A$ )는 범위가  $6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \sim 2.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  이며, LPE의 경우에는  $\sim 3.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  이다.[24]

SiC 검출기가 주로 사용되는 곳의 환경은 온도 범위가  $25 \sim 300^\circ\text{C}$ 를 가지며 Figure 5에 보였던 것처럼 SiC는 Si, GaAs, CdTe와 비교했을 때 누설 전류가 낮다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 방사선 검출기의 분광학적 능력을 추정하기 위해 사용되는 요소인, Equivalent noise energy(ENE)의 분포는 아래와 같이 주어진다. 이 때  $\epsilon_{\text{SiC}}$ 는 SiC에서 전

$$| \text{ENE} = 2.35 \cdot \frac{\epsilon_{\text{SiC}} \cdot \sqrt{A_3 \cdot q \cdot J \cdot S \cdot \tau_{sh}}}{q} \text{ [eV FWHM]} |$$

자-정공쌍을 만들기 위해 필요한 에너지,  $q$ 는 전하량,  $A_3$ 는 펄스 유형과 관련이 있는 상수,  $J$ 는 전류 밀도,  $S$ 는 다이오드 면적을 말한다.[27] 그러면 반도체 물질이 가장 적은 노이즈를 가지기 위해서는 검출기의 누설 전류가 가장 적게 흘러야 한다. 이것을 이루기 위해 최상의 결정체 품질을 가지며 이상적인 Schottky 접합을 지니는 4H-SiC 에피층 성장을 위해 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

Figure 6은 주변 온도 범위가 297K ~ 400K 인 환경에서 다이오드 면적이  $0.31 \text{mm}^2$  인 4H-SiC에 전압, 역전압 바이어스가 인가되었을 때의 전류를 나타낸다.

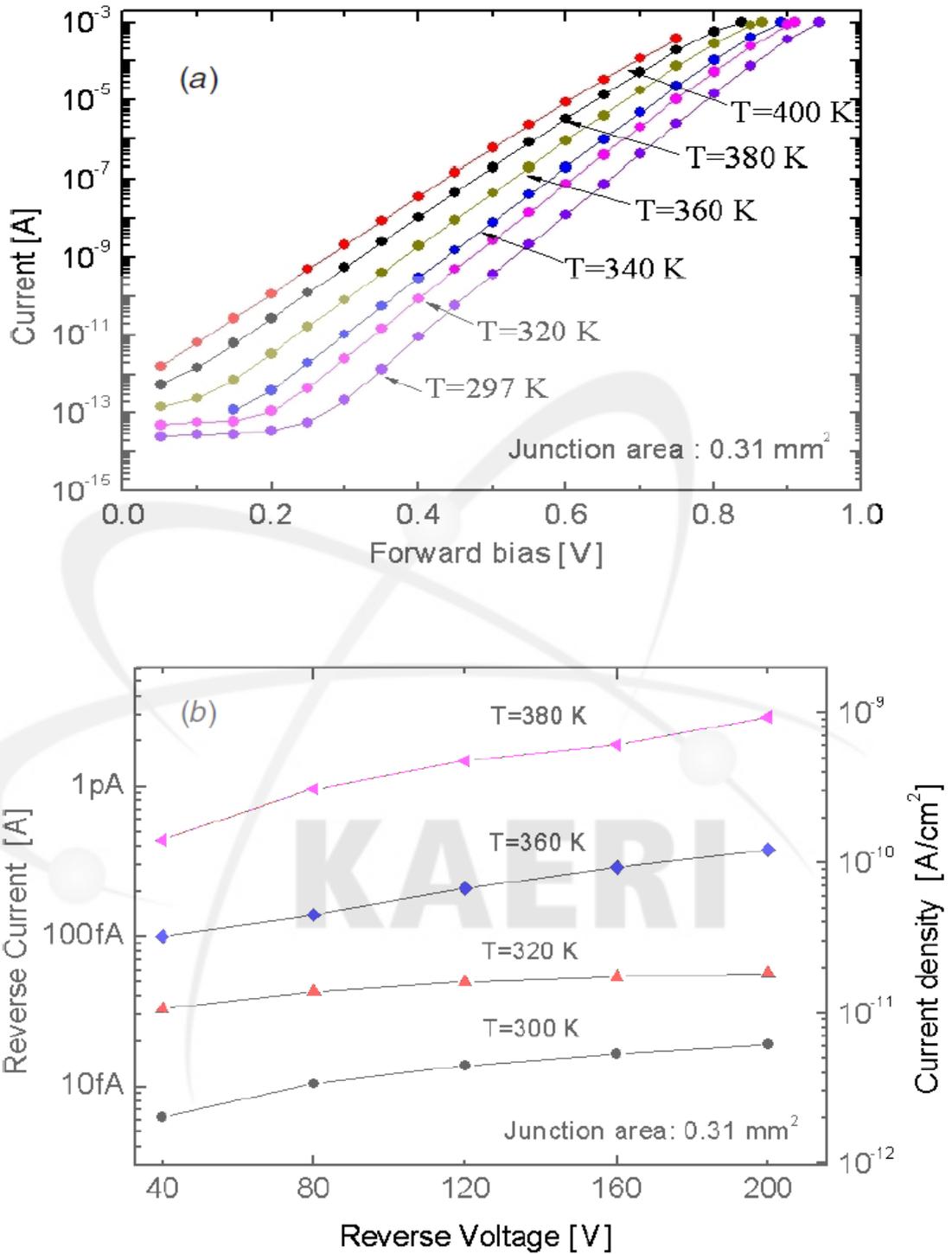


Figure 6. The current as a function of the bias acquired with dot circular Schottky diodes (area= $0.31 \text{ mm}^2$ ) realized on 4H-SiC semiconductor in (a) forward polarization and (b) reverse polarization

약 100여년에 걸쳐서 전압에 대해서 측정한 전류가 선형성을 가진다는 것이 확인되었다. 선형성을 나타내는 값  $n$ 이 Schottky 장벽 높이 (SBH)에 대해 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Ideality factor,  $n$ , and Schottky barrier height, SBH, for diodes realized on 4H-SiC semiconductor (area = 0.31 mm<sup>2</sup>) as a function of temperature and forward bias, respectively. In such calculations the experimental I/V data of figure 2 were used.

| $T$ (K) | $n$   | Forward bias (V) | SBH (eV) |
|---------|-------|------------------|----------|
| 297     | 1.076 | 0.3              | 1.160    |
| 320     | 1.072 | 0.4              | 1.168    |
| 340     | 1.060 | 0.5              | 1.181    |
| 360     | 1.057 | 0.6              | 1.197    |
| 380     | 1.065 | 0.7              | 1.201    |
| 400     | 1.054 |                  |          |

(i)  $n$ 은 온도에 영향을 받지 않으며, 이 값은 Schottky 장벽을 넘는 전자 수송 메커니즘으로 형성되는 열전자 전류의 분포를 무시한다.

(ii) Schottky 장벽의 크기는 Si, GaAs 물질이 같은 선형성을 가지기 위해 가지는 장벽 크기인 1.15 eV 보다 크다.

(iii) 상업적으로 이용되고 있는 검출기에 이용되는 기존 물질에서 얻어진 역전류 밀도 값과 비교했을 때 가장 낮은 수치를 보인다. 이것은 Figure 5를 보면 알 수 있다.

방사선 검출기의 전기적 특성을 나타내는 전기용량/전압 ( $C/V$ )를 측정하는 것은 상온에서 이루어진다. Figure 7은 역전압에 대한  $1/C^2$ 을 나타낸다. 인가된 전압, 유효 dopant 농도,  $N_{\text{eff}}$  값이 제시되어있다. Conduction 밴드 밀도가  $1.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  이고 SBH 값이 1.31 eV 일

때  $N_{\text{eff}}$ 는  $5.48 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  이었다.[20]

추가적으로 4H-SiC가  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  의 픽셀 형태일 때 매우 적은 역전류값 뿐만 아니라 전류 분포가 일정하다는 것을 알 수 있었고 이에 결정체 품질이 매우 우수하다는 것을 알 수 있다.



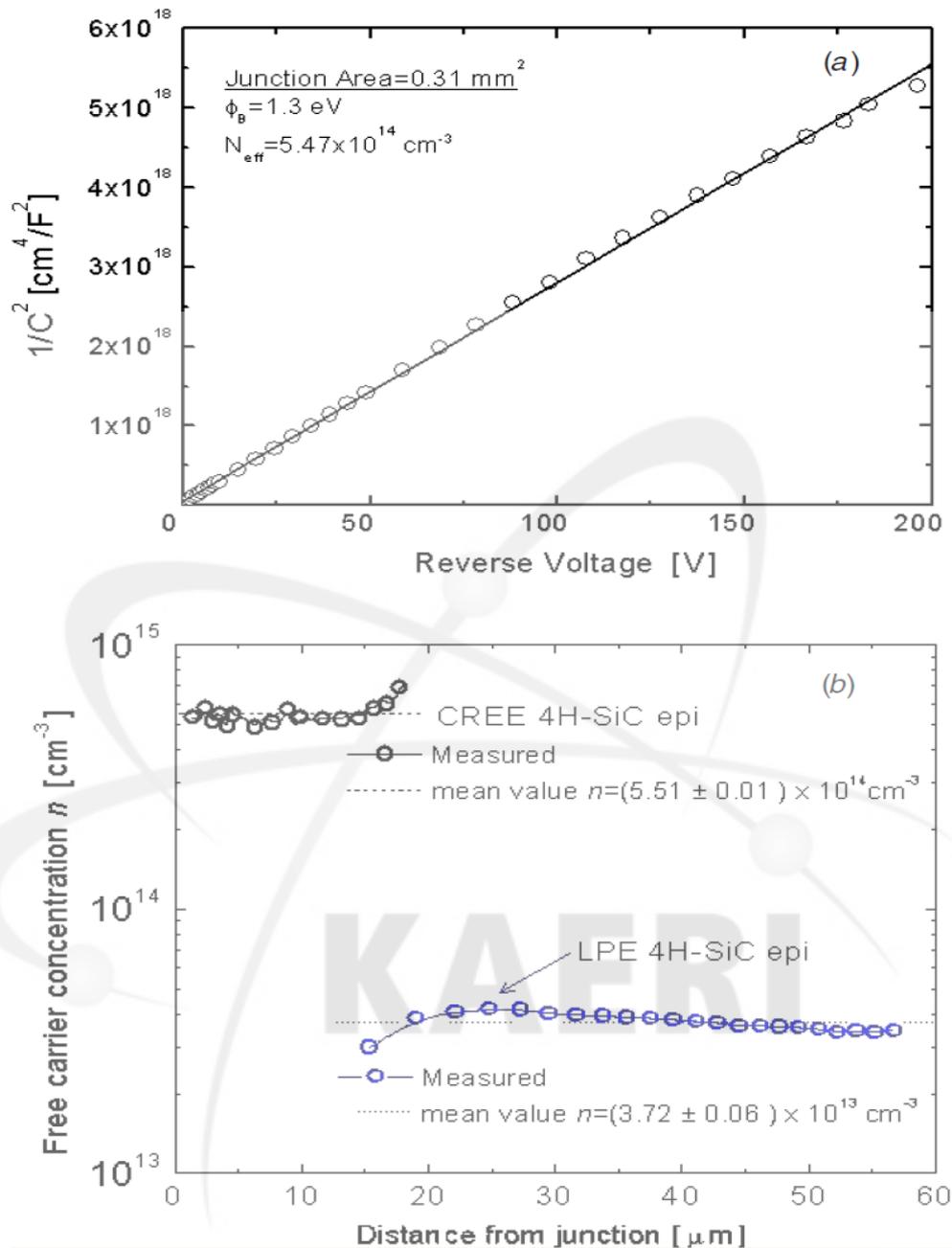


Figure 7. The reciprocal of the square capacitance,  $1/C^2$ , versus reverse voltage acquired with dot circular Schottky diodes (area =  $0.31 \text{ mm}^2$ ) realized on 4H-SiC semiconductor (a). Profile of the free carrier concentration for two undoped 4H-SiC epitaxial layers (b). The profile, derived from capacitance–voltage measurements on Schottky diodes, corresponds to the unintentional active dopant profile as a function of the distance from the junction.

Figure 8은 4 x 4 배열을 가지는 검출기의 전류 분포를 나타낸다. 상온에서 전류의 평균값이 5 fA 였는데, 이는 Si, GaAs에서 측정된 값에 비해 300배 적은 3 pAcm<sup>-2</sup>의 전류 밀도와 일치한다. 이것은 다른 반도체 검출기와 비교했을 때 SiC 검출기가 20배 작은 노이즈를 가진다는 것을 말한다. SiC는 상온에서 동작을 하면서도 적은 노이즈를 가지는 특징을 가지는 특수한 검출기이다.[28]

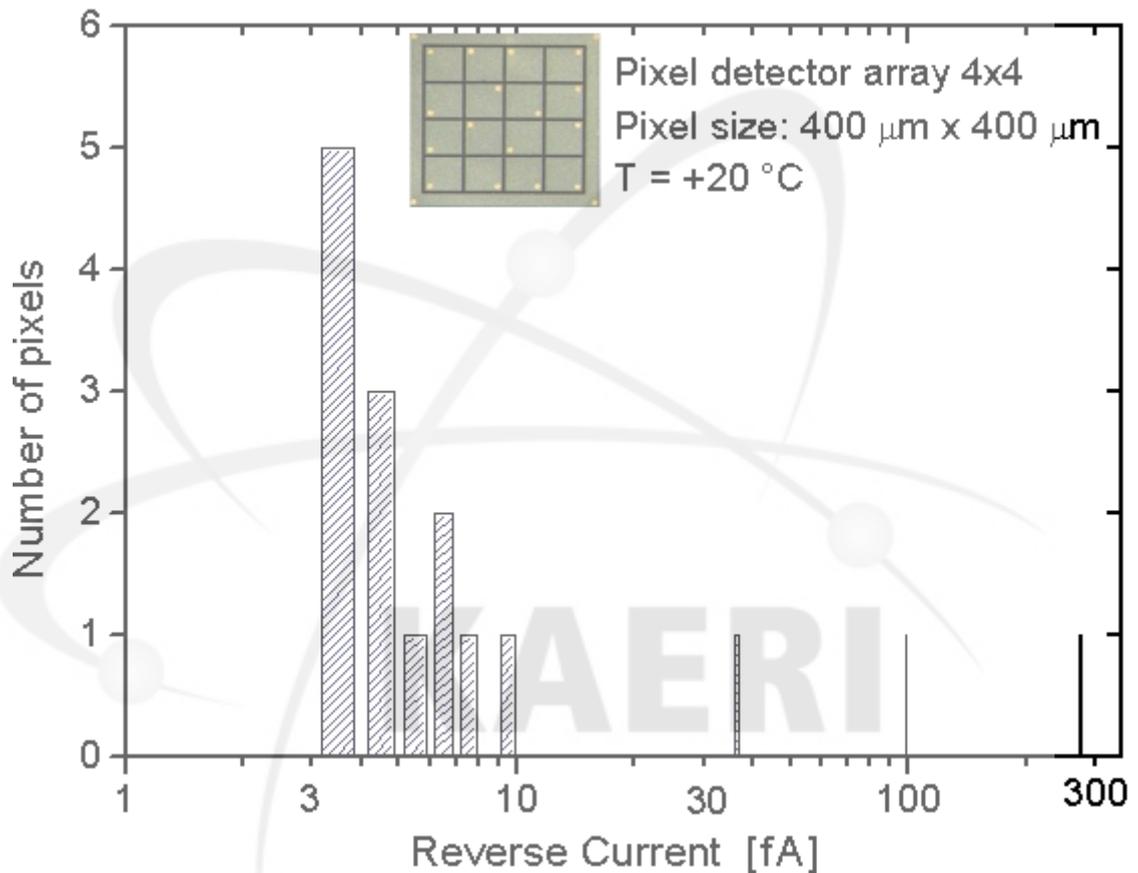


Figure 8. Reverse Current vs Number of pixels

## 4절 SiC 반도체 센서의 방사선 검출 특성

SiC 검출기의 동작 특성에 대한 분석과 관련된 주요 연구는 상대적으로  $10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  의 도핑 농도,  $30 \sim 50 \mu\text{m}$  의 두께를 가지는 n형의 4H-SiC를 이용해서 수행되어진다. 이 연구에 사용되는 Schottky barrier 검출기의 Schematic Cross section을 Figure 9에 나타내었다.

실험에서 1.5, 2 MeV 양성자 빔이 사용되어 다음과 같은 결과를 나타낸다. 에너지에 따라서 생성된 불균등한 전하의 검출이 전하-민감형 Preamp, 미적분 RC 회로에 의해 조절되는 Amplifier, 펄스 분석기를 포함하는 spectrometry 장비를 이용해서 수행된다. 방사선에 의해 생성되는 신호 스펙트럼의 모양 및 너비 등이 검출기 특성을 결정짓기 위해 분석되어진다.

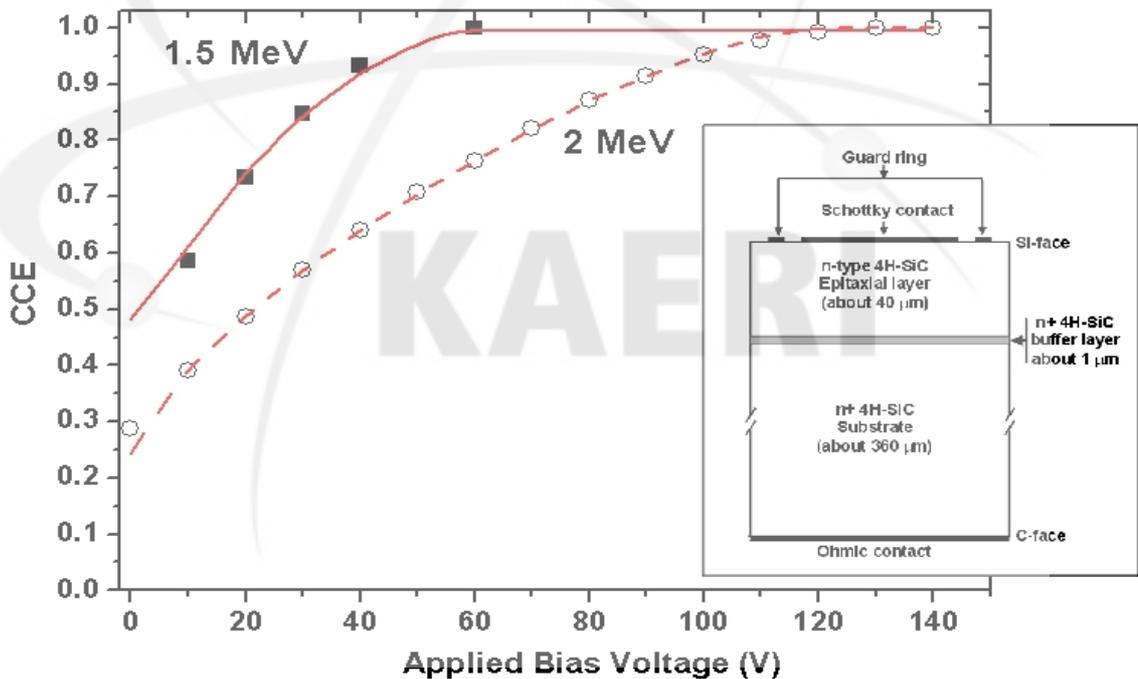


Figure 9. The CCE dependence on the reverse bias for Schottky 4H-SiC diodes irradiated by 1.5 and 2.0 MeV protons. The solid lines are the best-fit curves obtained by using the drift-diffusion expression (3). The inset shows the schematic Schottky diode structure mostly used in this detector performance study.

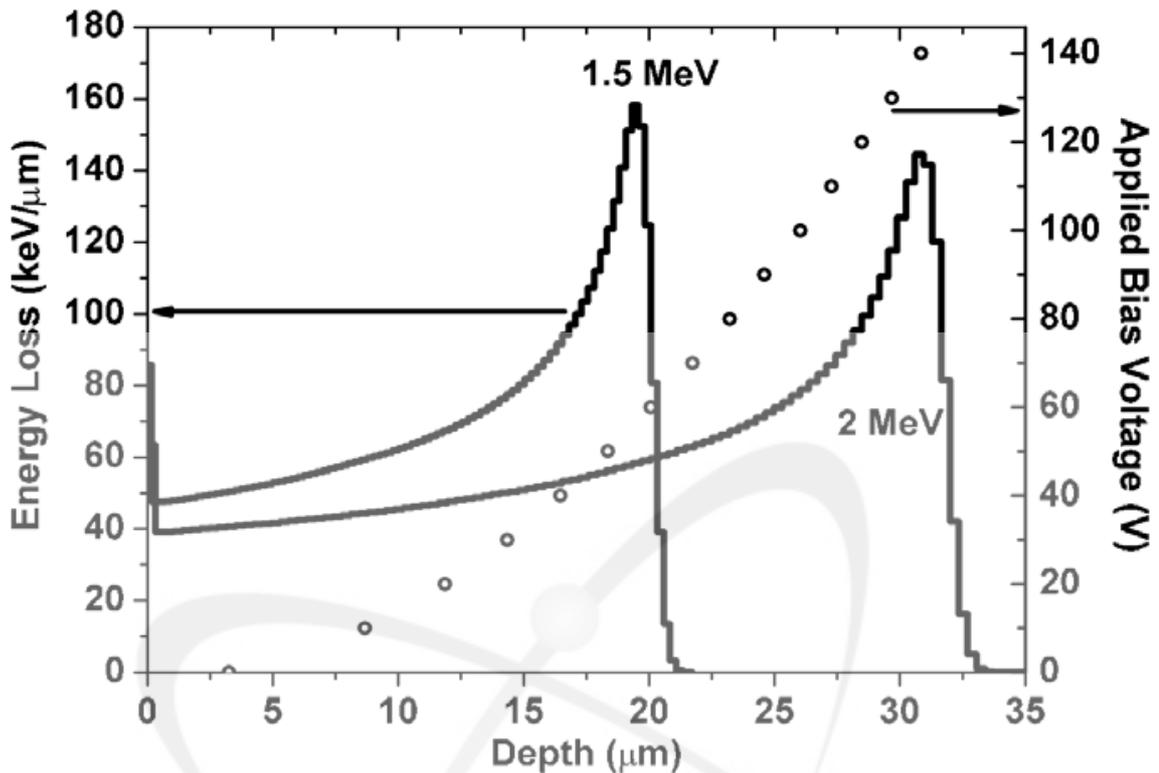


Figure 10. Bragg ionization curves of 1.5 and 2.0 MeV protons in a 4H-SiC epitaxial layer of 35  $\mu\text{m}$  thickness and depletion region dependence on the applied reverse bias for Schottky diodes realized on it.

## 1. 전하/비전하 입자 측정

첫 번째 스펙트럼은  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  선원이 조사된 Schottky 접합 n형 4H-SiC 검출기를 이용해서 측정되었다.  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  선원은 5.407 ~ 5.49 MeV의 단일 에너지를 가지는 알파 입자를 방출하는 자연 방사성 핵종이다. 단일 에너지를 가지는 알파 입자의 경우 SiC 검출기의 공핍층이 40 $\mu\text{m}$ 인 경우에 최대 17 $\mu\text{m}$ 까지 투과할 수 있고 전자-정공이 전하 캐리어 역할을 하기 때문에 Bragg 분포가 나타난다.

반도체 검출기의 검출 효율은 일반적으로 전하 수집 효율 (Charge Collection Efficiency, CCE), 반폭치 (FWHM)인 두 가지 변수에 의해서 결정된다. 검출되는 전하 생성률로 정의되는 CCE는 전하-트래핑 중심부

의 존재와 농도의 계산을 가능하게 한다. 게다가, 다른 유형의 방사선을 이용함으로써 전하 캐리어 즉, 전자-정공쌍의 평균 표류 거리를 계산할 수 있다.[29, 30] 두 번째로 FWHM은 신호의 통계적 변화를 설명하기 위해 보통 사용된다. 통계적 변화는 많은 변수들과 관련이 있다.[31] 그러나 전하 수집이 완전히 이루어지지 않으면 불균등한 전하의 이동은 당연한 것이다. 분명히 FWHM 값이 높으면 에너지 분해능이 나쁘다는 것을 말하며, CCE 값이 낮으면 저에너지 방사선을 검출하기 어렵다는 것을 말한다. 입자의 의해 생성되는 전하  $Q_0$  는 다음과 같이 주어진다. 이 때  $E$  는 투과 범위 내에서 입자에 의해 저장되는 에너지를 말한다.

$$Q_0 = q \frac{E}{\epsilon_{SiC}},$$

$\epsilon_{SiC}$ 는 1 ~ 2 MeV 에너지를 가지는 양성자 빔과  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ 의 세가지 선원 및 실리콘에서의 전자-정공쌍 한 개에서 잃는 평균적인 에너지 손실인  $\epsilon_{Si}$  값과 비교해서 결정된다.  $\epsilon_{SiC}$ 는  $\epsilon_{Si}$  값이 알파 입자 및 양성자에 대해 3.62, 3.64 eV 값을 가지는 것과 비교해서, 상온에서 알파 입자에 대해서는 7.78 eV, 양성자에 대해서는 7.79 eV 값을 가진다.[32]

Figure 9는 1.5, 2 MeV 에너지를 가지는 양성자 빔이 조사된 에피텍셜 4H-SiC 검출기에 역전압 바이어스가 인가되었을 때의 CCE를 나타낸다. 그래프에 기록된 CCE 값은 문헌 [15, 33]에 기록된 다른 데이터와 유사하다. 측정된 CCE 값이 포화상태에 이르기 위해서는 역전압 바이어스가 1.5 MeV 양성자의 경우에는 60V, 2 MeV 양성자의 경우에는 120V를 넘어야 한다.

Figure 10은 1.5, 2 MeV 에너지를 가지는 양성자 빔의 투과 깊이에 따른 에너지 손실을 나타낸다. 또한, 주어진 투과 깊이를 감소시키기 위해 필요한 역전압도 나타나있다. 80V의 역전압이 인가되었을 때, 2 MeV 양성자에 의해 전기장이 없는 영역에서 생성되는 정공 전하 캐리어는 드리프트 영역 내에서 수집되는 반면에, 1.5 MeV 양성자에 의해 생성되는 전하 캐리어는 드리프트 모델에 따라서 수집된다. 드리프트-확산 모델에 따

르면 최소자승법을 이용하여 CCE 곡선은 정공 확산 길이인  $L_p$ 에 관해서 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다. 방정식에서 첫 번째 항은 공핍층에서 드리프트에 의해 수집된 전하를 말한다.

$$\text{CCE} = \frac{1}{E} \left\{ \int_0^W \frac{dE}{dx} dx + \int_W^\Gamma \frac{dE}{dx} \cdot \exp \left[ -\frac{x-W}{L_p} \right] dx \right\}$$

두 번째 항은 확산되는 전하 캐리어의 분포를 나타낸다. 정공의 확산 길이  $L_p$ 는  $7.0\mu\text{m}$ 이다. 아래 방정식을 이용하여 정공 수명이  $160\text{ns}$ 라는 것을 알 수 있다. 이 때  $k_B$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 장치 온도를 나타낸다.

$$L_p = \sqrt{(k_B T/q) \times \mu_p \times \tau_p}$$

세계 곳곳에 분포되어있는 연구 기관에서 성장된 반도체 물질이 이용된 검출기에서 측정된 정공 확산 길이가 비슷한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.[15]

단일 에너지를 가지는 빔의 인가전압이 변화할 때, 빔의 입사 방향 관점에서 샘플이 회전하는 것은 소수 캐리어의 확산 길이를 최소화할 수 있는 방법을 제시하며  $L_p$ 를 구하기 위해 사용되는 변수들을 근소화할 수 있는 효율적인 방법을 제공한다.

최근에  $4.8 \sim 7.7 \text{ MeV}$ ,  $3.18 \sim 8.38 \text{ MeV}$  에너지를 가지는 알파 입자를 방출하는 선원을 이용하여 4H-SiC 물질이 이용된 검출기의 스펙트럼을 측정하여 특성 파악을 한 연구가 Ivanov, Ruddy [35, 36]에 의해서 수행되었다. 그들은 첫 번째로  $26, 55\mu\text{m}$  두께로 성장된 n형 4H-SiC 에피택셜 층에 크로뮴으로 두께  $1000 \text{ \AA}$  도핑된 Schottky 다이오드를 이용하였고 두 번째로는  $100\mu\text{m}$  두께로 성장된 에피택셜 층에 금- $9000 \text{ \AA}$ , 백금- $1000 \text{ \AA}$ , 티타늄- $800 \text{ \AA}$ 으로 도핑된 다이오드를 이용하였다.[35, 36]

측정되는 FWHM에 영향을 미치는 요소들은 문헌 [36]에 정확히 기술되어 있으며, 특히 Au/Pt/Ti이 같은 두께로 도핑된 Si 검출기의 FWHM 데이터가 포함되어 있어 SiC 검출기와 비교가 가능하다.  $3.18 \text{ MeV}$  알파

입자를 방출하는  $^{148}\text{Gd}$  선원으로로부터 측정된 FWHM 값은 전기적 및 통계적 오차가 많기 때문에 SiC, Si 검출기에서 측정된 FWHM 차를 이용함으로써 저자는  $(\text{FWHM})_{\text{SiC}}$  값을 19.4 keV로 추측하였다.[36] 이 값은 5.0 - 5.5 MeV 알파 입자를 이용하여 측정된 20 keV와 비교했을 때 추측값이 신뢰성이 있다고 판단된다.[35] 실제로 Strokan에 의해서 계산된 알파 입자의 에너지 분해능의 이론적인 한계치는 문헌 [35]에서 측정된 값보다 약 절반 수준을 가진다.[35, 37] 차이를 보이는 이유는 사람들이 이용한 SiC 검출기 입사창의 설계가 차이가 있기 때문이다. 앞서 언급된 결론과 500 Å 두께의 Schottky 접합 구조를 가지는 SiC 다이오드의 제작이 가능하기 때문에 문헌 [36]의 저자는 Si에 기초를 둔 검출기의 에너지 분해능 보다 SiC 다이오드 분해능이 훨씬 좋을 것으로 예상한다.

Figure 11은 인가된 전압이 100V인 상태에서 1.5 MeV 양성자 빔이 조사된 지름 1.5 mm를 가지는 Ni/Au가 Schottky 전극으로 증착된 4H-SiC 다이오드의 스펙트럼과 단면도를 나타낸다.[34] 결합을 위해 사용된 Silver paste, Gold wire와 연관 있는 Black region에서 떨어진 경우, 검출기는 균등한 CCE 값을 가지며, 또한 검출기 표면에 방사선을 조사함으로써 얻어진 CCE 값의 에너지 분해능이 약 24 keV를 나타내었다. 그러나 이온 투과 범위  $\phi_0$ 가 활성층 (W)의 두께와 유사하거나 클 때, 불균등한 IBIC 단면이 관측되고 에피택셜 층과 기판 사이에 위치한 버퍼층에 결합을 생성하게 된다.[26] IBIC 영상과 비교했을 때 XBIC 단면은 Figure 12와 같이 균등한 광전류 반응을 보인다. 그러나 표면 쪽에 구조적 결함이나 전자를 발견하지 못하는 것은 Figure 13에서 x-ray가 투과를 거의 하지 못한다는 것 (3 keV)을 말한다.

4H-SiC 검출기 배열에서 가장자리 효과는 IBIC, XBIC 기술에 의해서 연구되었다. Figure 14는 Figure 8에서 보인 픽셀 전극 위에 전극 경계면에 수직 방향을 따른 XBIC, IBIC 프로파일을 보여준다. IBIC 프로파일이 1.5 MeV 양성자에 대해 상대적으로 투과를 못하기 때문에 표면에 덜 민감한 반면에, XBIC에서는 가장자리에 가까운 지역에서 전하의 수집 효율이 좋아서 상당히 민감하고 공간 분해능이 우수한 것을 알 수 있다.

현재, 탄화규소 (SiC)는 Large Hadron Collider (LHC)와 같은 차세대 가속기에서 계획 중인 고선량 방사선이 이용되는 실험에서 검출기 물질로써 적합하다고 여겨진다.

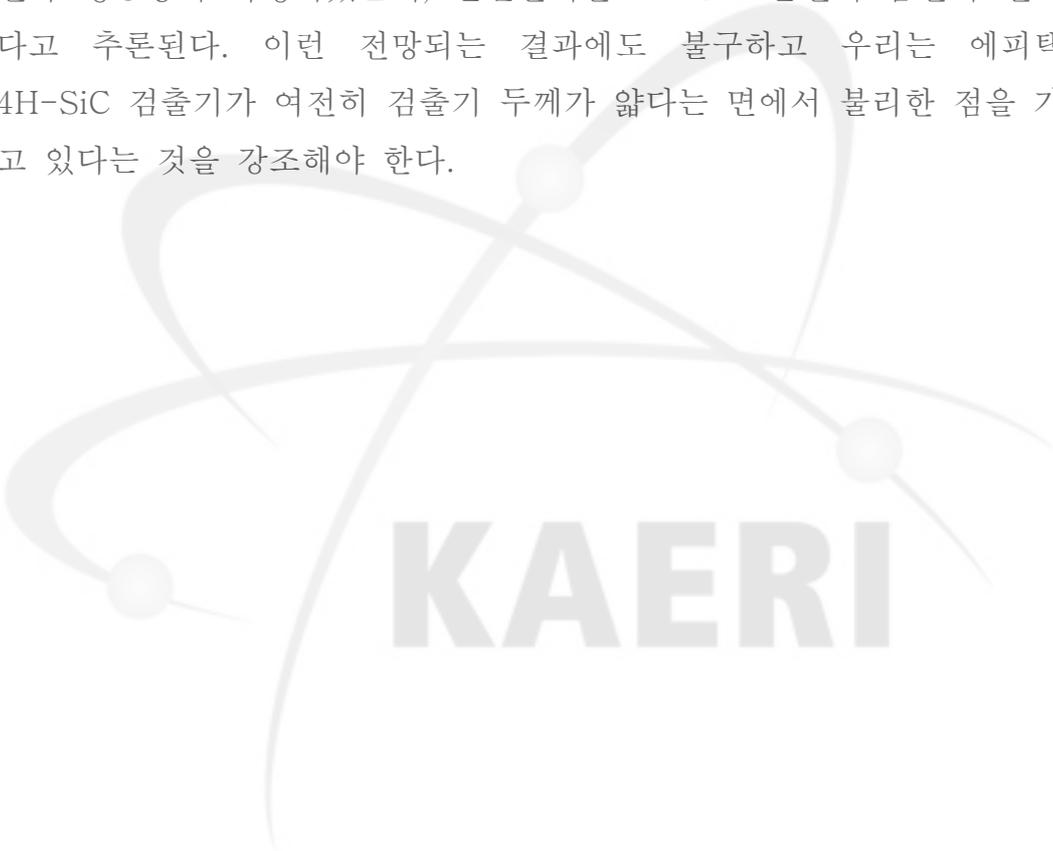
방사선 추적을 위한 검출기 물질로써 SiC의 전망은 Rogalla, Dubbs에 의해서 처음 연구되었다.[21, 38] Rogalla는  $^{90}\text{Sr}$ 이 방출하는 베타 선원을 이용하여 실험을 하였는데, 이 때 검출기는 샌드위치 방식을 이용한 ohmic 접합으로 된 두께  $300\mu\text{m}$ 의 4H-SiC 검출기였다. 실험 결과로 신호 및 노이즈 스펙트럼은 우수한 분해능을 보였으나, 전하 수집 효율은 약 12%이면서 신호는 시상수 14분으로 지수적으로 감쇠한다는 것을 알 수 있었다. 이 결과들은 전하 캐리어들이 이동을 하며 중심부에 속박될 때 재료에 결함 및 불순물이 존재한다는 것을 말한다. 대조적으로, 에피택셜 SiC는 결정구조의 품질이 우수하기 때문에 LHC와 같은 가속기에서 위치 민감형 검출기에 이용될 수 있다.[5] 최근에, 4H-SiC Schottky 접합에 기초하여 제작된 Minimum ionizing particle (MIP) 검출기와 p+n 접합 구조가  $0.1\text{mCi}$ 의  $^{90}\text{Sr}$  베타 선원에 의해 조사된 실험이 행해졌다. 두 실험에서 단지 2.2 MeV의 고에너지를 가지는 전자에 의해 생성된 신호만이 분석되었다. 이온화 수를 세기 위해서 라이트 가이드를 이용하여 PM tube와 4H-SiC 검출기 사이에 플라스틱 섬광체를 부착하여 신호 생성의 트리거로써 사용했다. 세부적인 실험 절차와 전하 수집 효율의 측정은 참고문헌에 기술되어 있다. [22, 23]

실험 결과 분석의 주요한 점은 다음과 같다.

(a) 각 인가전압에 대해, 전하로 인해 발생된 신호는 안정적이며, 극성효과를 보이지 않았고 재현성을 보일 수 있었다.

(b) 가장 높은 전압이 인가되었을 때, 펄스 스펙트럼은 Landau, Gaussian 분포를 따르는 2개의 뚜렷한 곡선을 나타내었는데, Gaussian 분포를 따르는 곡선은 분석을 통해 전기적 노이즈에 의한 곡선인 것을 확인하였다.[39]

Figure 15는 4H-SiC 기판위에 40 $\mu\text{m}$  두께로 에피택셜 층이 성장되고  $6 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  농도로 도핑된 n형의 Schottky barrier 검출기에 역전압 바이어스가 인가되었을 때의 수집된 전하량을 보인다.[22] 인가 전압이 60V일 때, 커패시턴스와 전압의 곱으로 나타낼 수 있는 전하 수집량이 포화되었으며, 약  $2090e^-$ 를 나타내었다. CV 측정값에 의해 추론된 공핍층 영역의 두께가 38 $\mu\text{m}$ 일 때, SiC 내 MIP 검출기는  $\mu\text{m}$  당 전자-정공쌍의 수가 약 55개로 측정되었다. 문헌 [21]에서 수행된 실험에서는 51개의 전자-정공쌍이 측정되었는데, 반절연체인 4H-SiC 물질의 품질이 떨어진다고 추론된다. 이런 전망되는 결과에도 불구하고 우리는 에피택셜 4H-SiC 검출기가 여전히 검출기 두께가 얇다는 면에서 불리한 점을 가지고 있다는 것을 강조해야 한다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three spheres representing protons and neutrons. Below the symbol, the word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font.

KAERI

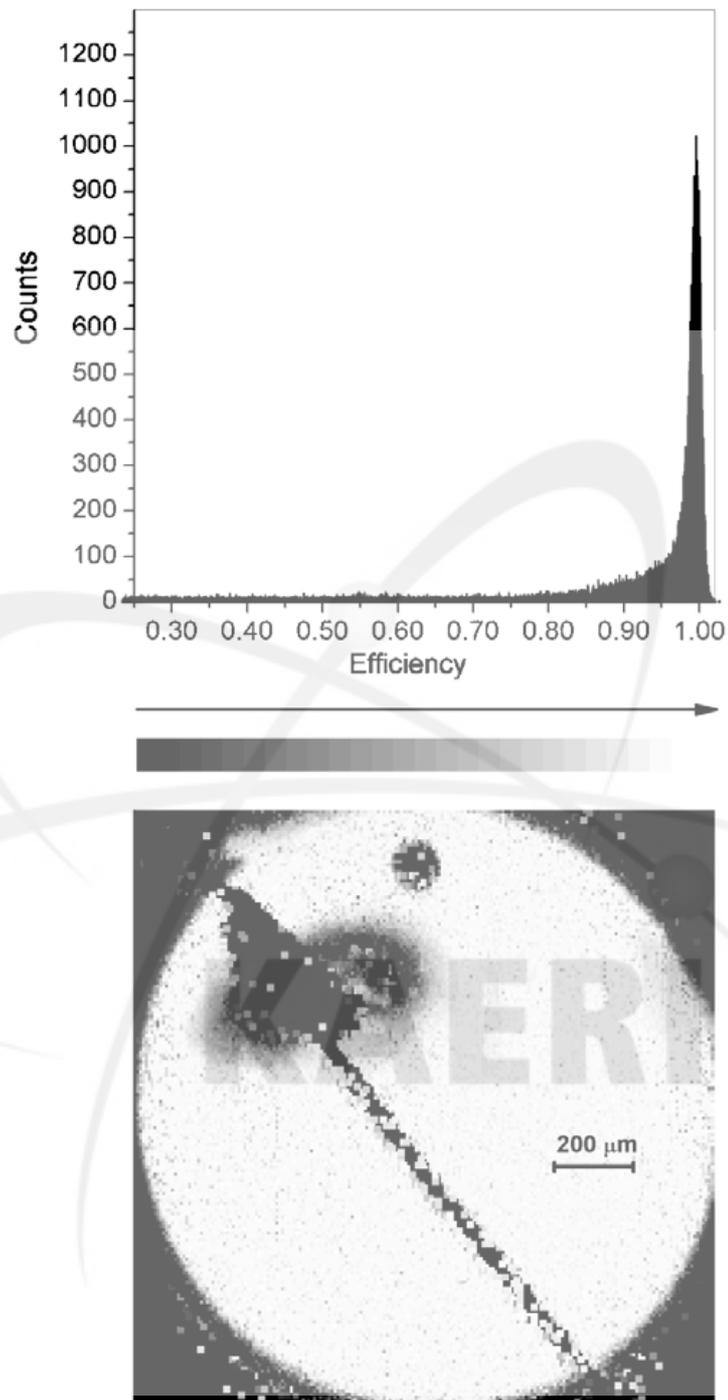


Figure 11. IBIC map (b) of a 4H-SiC diode with the relevant spectrum (a) collected at room temperature with a reverse bias voltage of 20 V. A focused 1.5 MeV proton ion beam (spot size  $\sim 5 \mu\text{m}$ ) has been used.



Figure 12. X-ray photocurrent maps of two 4H-SiC Schottky diodes ( $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ ).

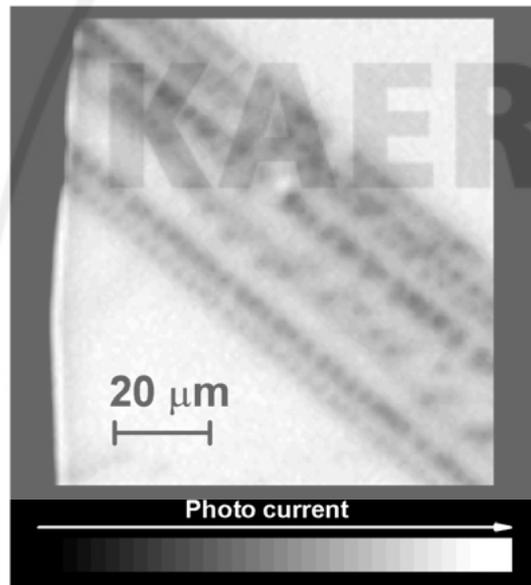


Figure 13. XBIC maps of defective zones acquired with a photon energy of 3 keV and unbiased 4H-SiC Schottky diodes.

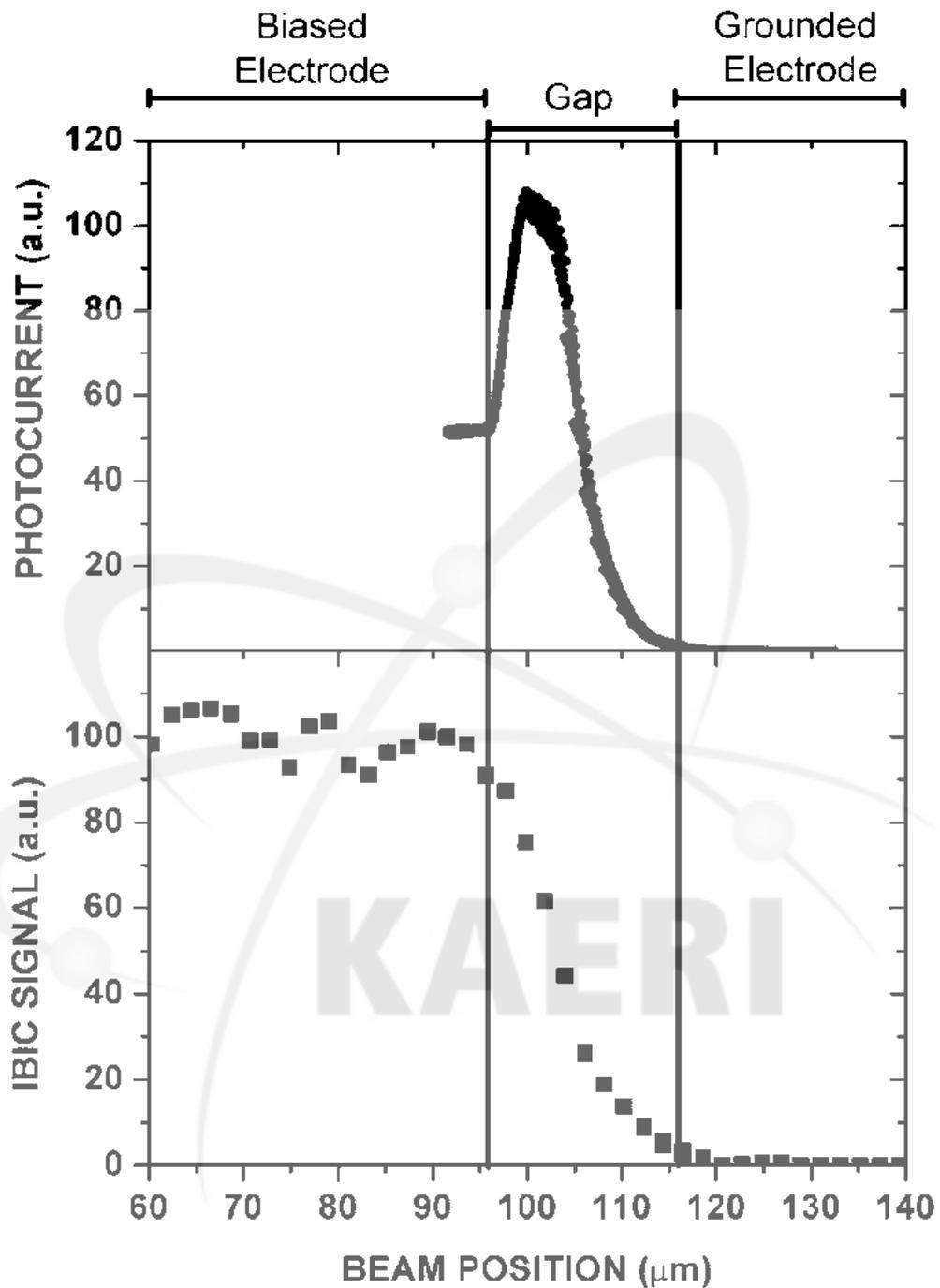


Figure 14. XBI (a) and IBIC (b) profiles acquired perpendicularly to the electrode border of the microdiode of figure 12. The XBI profile evidences an electric field enhancement in the proximity of the electrode border.

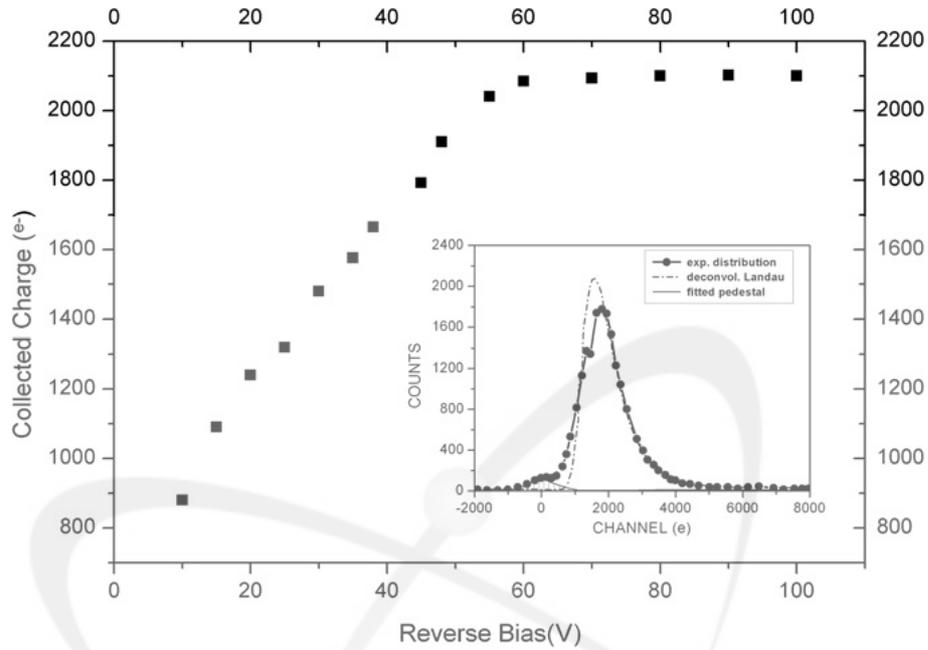


Figure 15. Collected charge dependence on the applied reverse bias for 4H-SiC Schottky diodes irradiated by beta particles (MIPs). The inset shows the pulse height spectra (•) fitted with a Landau (---) and a Gaussian (—) distribution. The x axis scale has been converted into units of electron charge.

중성자는 전기적으로 중성이기 때문에, SiC 물질의 중심에서 행해지는  $^{28}\text{Si}(n, \alpha)^{25}\text{Mg}$ ,  $^{12}\text{C}(n, n^{\prime})^3\alpha$ ,  $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 와 같은 핵반응으로 인해 생성되는 고에너지 하전입자가 실리콘, 탄소 원자핵과의 내부 전환 반응을 통해 발견될 수 있다.

내부 전환 반응을 기초로 한 고속 중성자 검출기가 제작되었고  $^{252}\text{Cf}$  또는  $^{241}\text{Am-Be}$  중성자 선원, 우주 방사선에 포함된 중성자를 이용하여 스펙트럼을 측정하여 평가하였다.[40]

A. R. Dulloo과 그의 동료들은 크기가 작은 4H-SiC Schottky 다이오드 표면에 LiF를 증착하여, 에피택셜 4H-SiC 다이오드가 중성자 검출에 우수하다는 것을 증명하였다.[17] 다이오드에서는 다이오드와 LiF 사이에

있는 가느다란 Al 흡수체에 의해 알파 입자는 투과를 하지 못하는 반면에, LiF 컨버터를 통해 생성되는 중성자로 인해 반응을 확인할 수 있었고 SiC 활성층으로 투과할 수 있었다.

제작된 검출기를 이용하여 측정한 실험 결과로부터 SiC 물질이 방사선 강도가 뛰어나며 중성자와 감마선을 구별할 수 있고, 89°C에서의 고온에서도 작동이 가능하다는 것을 알 수 있었고, 이를 통해 사용 후 핵연료로부터 생성되는 중성자를 실시간 감시할 수 있는 등 여러 분야에 이용이 가능하다는 것을 알 수 있었다.[41]

최근에 하전입자 또는 x-ray 분석을 위해 개발된 과정과 유사한 기존 실험에 이용된 검출기보다 더 큰 (7 or 20 mm<sup>2</sup> active area) 중성자 검출기가 제작되었다.[42, 25] 50μm 두께의 에피택셜 층을 가지는 4H-SiC의 n형에 10<sup>14</sup>cm<sup>-3</sup>으로 도핑이 되면 250V에서 검출기가 동작이 가능하다. 이런 요소들은 검출기의 계수 효율과 SiC 다이오드의 Schottky 접합 부인 Au/Ni 옆에 두께 100μm로 증착된 LiF으로 발생하는 <sup>6</sup>Li(n, α)<sup>3</sup>H 핵반응에 의해 생성되는 하전입자로부터 만들어지는 신호 수집 효율을 증가시키기 위해 정의된다. 실제로, 2.05 MeV 알파 입자와 2.73 MeV 트리톤의 최대 투과 깊이는 5μm, 28μm이기 때문에, 공핍층에서 생성된 전자-정공쌍의 빠른 이동속도로 인해 높은 전하 수집 효율이 기대된다.

Figure 16은 epithermal 중성자 조사로 인한 에너지 스펙트럼을 나타낸다. Figure 16에 보이는 두 가지 스펙트럼은 SiC 다이오드에 LiF의 유무에 따라 다르게 나타난다. 스펙트럼의 편평한 부분은 LiF에서 이온이 등방성으로 방출되고 컨버터 내부에서 입자의 에너지 손실이 발생하기 때문에 나타난다.[43] Figure 16에서 보듯이 500 keV 아래에서는 감마선에 대한 신호가 중성자 신호와 쉽게 구별이 되는 것을 알 수 있다.

epithermal 중성자를 이용하여 0.3%의 중성자 검출 효율이 측정되었고 10<sup>13</sup>cm<sup>-2</sup>의 중성자 플루언스가 입사했을 때, 알파 입자에 대한 데미지 때문에 0.3%보다 적은 계수 효율이 측정되었다.

이 실험으로 인해 4H-SiC 물질은 중성자 밀도가 높은 환경에 적합하다는 것을 확인하였고 특히 boron neutron capture therapy (BNCT)같이 의료 분야에도 이용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

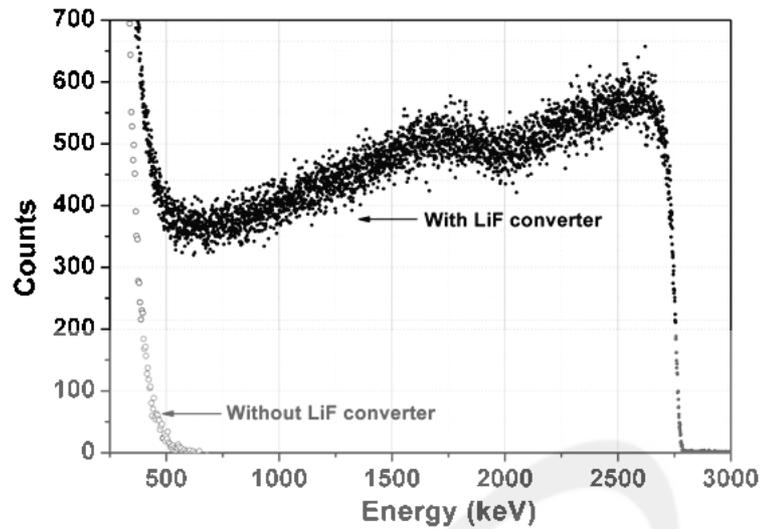


Figure 16. Epithermal neutron spectrum acquired with (•) and without (◦) the LiF converter. It can be observed that the maximum particle energy is due to 2.73 MeV tritium, as expected for epithermal neutrons. Large area (20 mm<sup>2</sup>) Schottky diodes polarized at 80 V have been used.

## 2. 엑스선 스펙트럼 측정

SiC 검출기가 적절한 효율을 가질 수 있는 입사 광자의 에너지 범위는 20 keV 이하이다. 광자 에너지가 약 50 keV에 도달하면, 광전효과가 주로 일어난다; SiC의 선형 감쇠 계수는 광자 에너지가 1.7 keV보다 높을 경우에는 실리콘의 감쇠 계수와 거의 같지만 1.7 keV보다 낮을 경우에는 SiC의 선형 감쇠 계수가 더 높다.[44] 실제로, 300 $\mu$ m 두께의 SiC 검출기는 광자 에너지가 10 keV보다 작을 때, 90%의 높은 흡수 효율을 가지지만 20 keV 넘을 경우에는 25%로 효율이 떨어진다.

전자-정공쌍 생성 에너지  $\epsilon_{SiC}$ 는 7.8 eV로 측정된다.[44] 실리콘의 전자-정공쌍 생성 에너지는 3.7 eV이기 때문에 SiC 검출기의 경우 광전효과로 발생하는 전하 신호는 실리콘 검출기에 비해 절반 정도이다. 신호의 통계적 변화는 실리콘 및 GaAs에 경우에 0.12로 측정되는 Fano factor

에 의해 결정된다. SiC의 intrinsic line width  $(F \epsilon_{\text{SiC}} E_{\text{ph}})^{1/2}$  는 1.45의 값을 가진다.

반도체 검출기의 일반적인 노이즈의 원인은 누설 전류와 관련이 있다. 일반적으로 검출기에서 흘러나오는 누설 전류( $\text{Acm}^{-2}$ )는 검출기 표면의 단위 면적당 흐르는 전류를 말한다. SiC 검출기의 누설 전류는 Figure 5에 보인 것처럼 다른 반도체 검출기에 비해서 약 100배 정도 적은 값을 보인다. 4H-SiC의 누설 전류가 다른 검출기에 비해 적으므로 전기장이 강한 환경에서 이용이 가능하다. 검출기 노이즈는  $I^{1/2}$ 에 비례하기 때문에, SiC 검출기의 노이즈는 다른 검출기 보다 10배 적다.

게다가, Figure 5에 보인 것처럼, 다른 반도체 검출기가 상온에서 J 만큼의 누설 전류가 흐를 때, SiC는 127°C의 높은 온도에서 J 만큼의 누설 전류가 흐른다.

우선 4H-SiC의 경우 전하가 열을 생성하는 것을 완전히 무시할 수 있을 정도의 넓은 밴드갭 에너지 (3.3 eV)를 가지고  $\text{Ni}_2\text{Si}/\text{SiC}$  Schottky 장벽 높이가 열전자 방출을 방해할 정도로 높기 때문에 누설 전류가 적다. 누설 전류가 적기 때문에, SiC 검출기는 우수한 에너지 분해능을 가진다.

Figure 17은 상온에서  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{241}\text{Am}$  선원을 각각 이용하여 SiC 검출기 (100 $\mu\text{m}$  diameter)에서의 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 펄스선에서 측정된 에너지 분해능은 144, 164 eV FWHM을 나타내었다. 전기적 장치에 노이즈가 없다고 가정하면, 스펙트럼의 너비는 SiC 검출기의 누설 전류로 인한 노이즈에 대한 영향은 무시할 수 있기 때문에 단지 생성된 전하의 수의 통계적 변동에 의해서만 결정될 것이다.[45] Figure 18은 100°C에서  $^{55}\text{Fe}$  선원이 조사된 SiC 검출기의 에너지 스펙트럼을 나타내며, 에너지 분해능은 196 eV FWHM이다. 이것으로 상온에서 에너지 분해능이 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

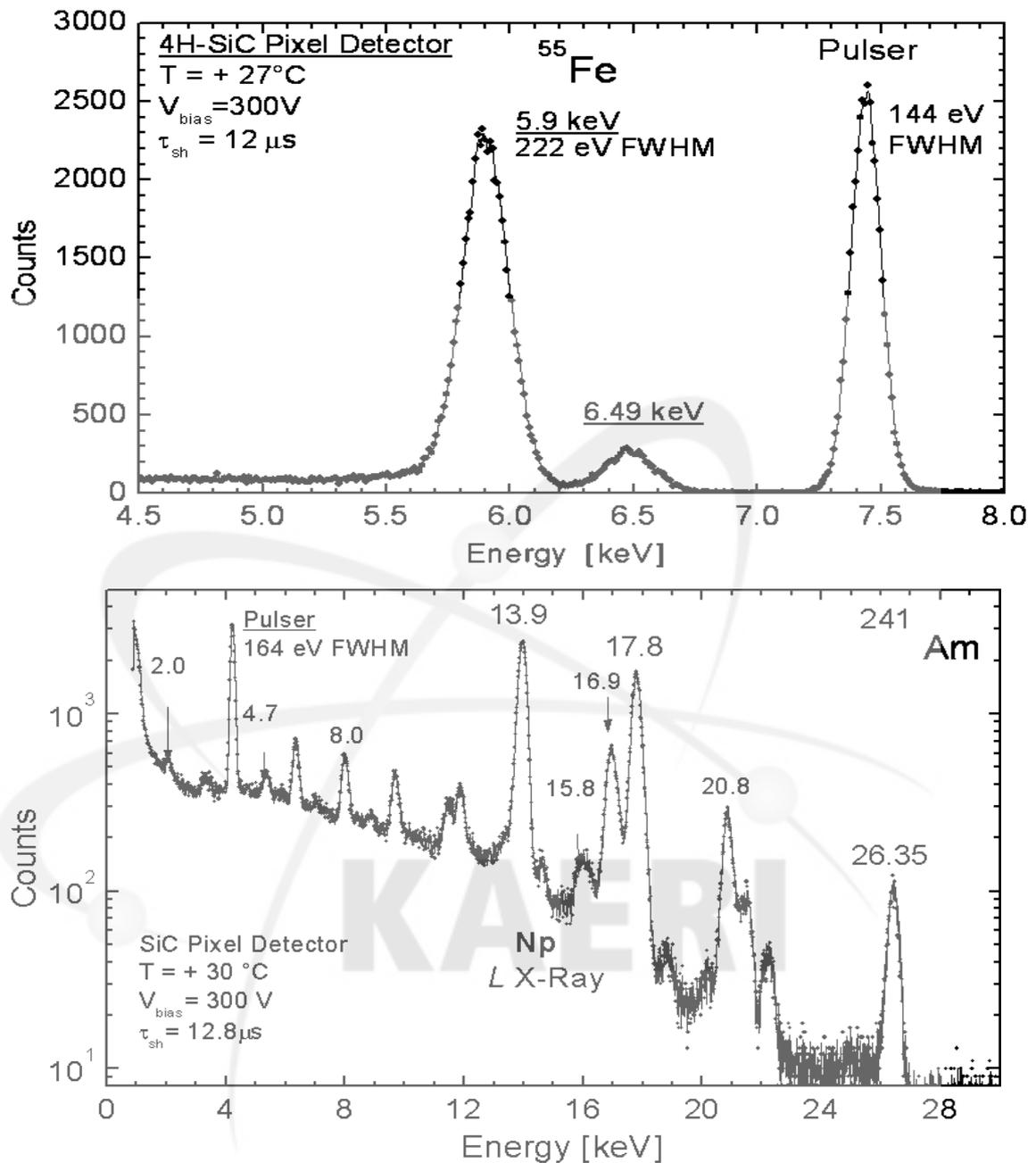


Figure 17. Spectrum of  $^{55}\text{Fe}$  source acquired at +27 °C with a SiC pixel detector (100 μm diameter) and an ultra-low noise front-end. The pulser line width is 144 eV FWHM corresponding to an equivalent noise charge of 7.8 electrons rms (a). Spectrum of x and γ rays generated by a  $^{241}\text{Am}$  source and acquired with a SiC pixel detector at +30 °C for about 8 h. The pulser line width is 164 eV FWHM (b).

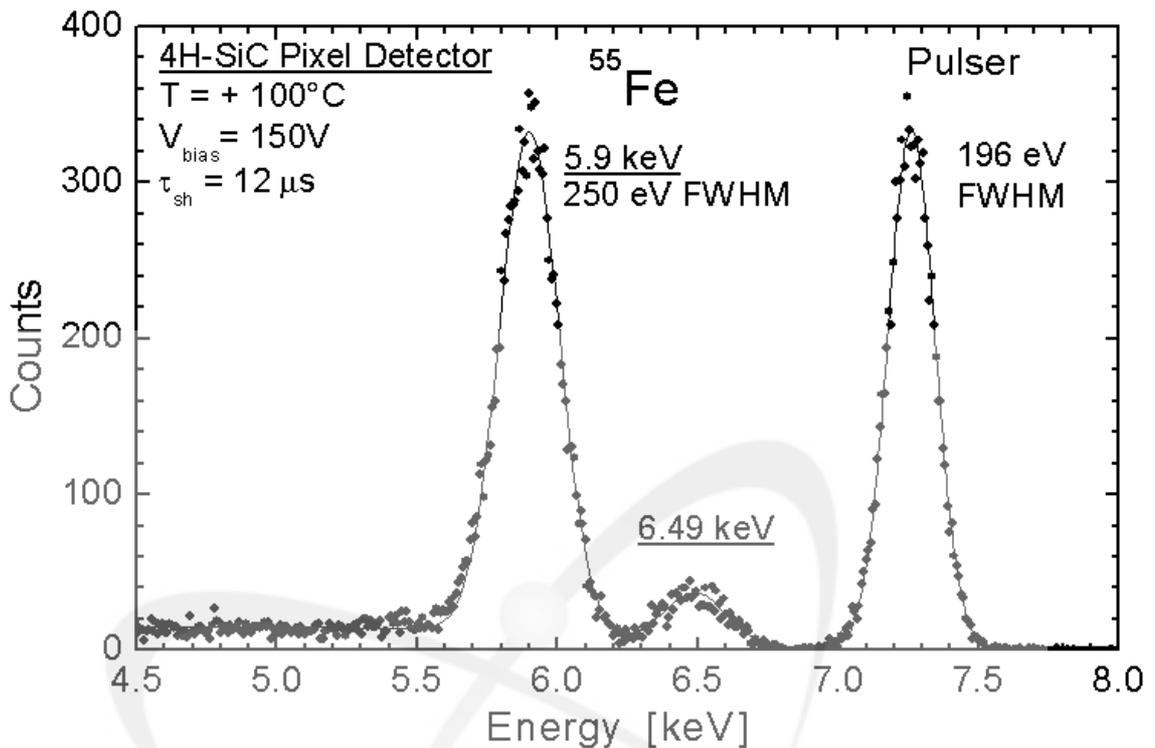


Figure 18. Spectrum of  $^{55}\text{Fe}$  source acquired at +100 °C with a SiC pixel detector (100  $\mu\text{m}$  diameter) and an ultra-low noise front end. The pulser line width is 196 eV FWHM corresponding to an equivalent noise charge of 10.7 electrons rms.

현재 SiC 검출기는 100 $\mu\text{m}$  보다 적은 활성 영역 두께를 가지므로 x-ray 분석을 위해 사용하기에는 어렵다. 이 두께는 실리콘, CdTe, CdZnTe와 같은 다른 반도체 검출기가 300 ~ 500 $\mu\text{m}$ 를 가지는 것에 비하면 얇다고 볼 수 있다. 활성 영역의 두께가 얇다면 먼저 검출할 수 있는 x-ray 에너지의 범위가 작아지고 검출기의 단위 면적당 capacitance가 증가하는데 이는 Preamp의 노이즈를 증가시킨다.

SiC 검출기의 활성 영역 두께가 얇은 이유는 다음과 같다.

(a) Bulk SiC : 반절연체 물질로 400 $\mu\text{m}$  두께로 제작이 가능하지만, x-ray를 검출하기에는 결함 농도가 높다.

(b) SiC에 100 $\mu\text{m}$  까지 에피택셜 층을 성장시킬 수 있다.

(c) 적절한 인가전압 상태에서 도핑 농도가  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  보다 크면, 공핍층의 두께가 100 $\mu\text{m}$  정도로 제한된다.



## 제4장 탄화규소 반도체 센서의 방사선 노화

감마선 뿐만 아니라 전자, 양성자, 파이온, 알파입자, 중성자 등의 에너지를 가진 입자들은 검출 물질에 두 가지 형태의 방사선 손상을 입힌다는 사실은 이미 잘 알려져 있다 :

- 1) 비전리 에너지 손실에 의한 대형 손상 (NIEL)
- 2) 전리 방사선에 의한 표면 손상 (IEL)

점손상, 부분손상을 포함한 대형 손상의 경우 방사선을 검출하기 위해 사용하는 물질의 종류와 상관없이 검출기의 누설전류 증가를 초래한다. 일반적으로  $\text{SiO}_2$ 에서 패시베이션(passivation) 층 표면에 전하가 축적됨으로써 이러한 문제가 야기 되며, 성능을 저하시키며, 콘덴서와의 결합과정에서 또 다른 노이즈를 만들 수 있다.[46]

위에 언급된 손상은 전하 수집 효율을 저하시키고 노이즈를 증가시킴으로써 신호대비 잡음률을 떨어뜨리고, 결과적으로 에너지 분해능과 같은 검출기 성능에 악영향을 끼친다. 위치 민감형 검출기의 경우에는 공간 분해능을 저하시키기도 한다. 이미 이에 관한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 여전히 현재도 이 손상에 관한 심도 있는 이해를 위해 연구가 진행중이며, 검출기 성능에 미치는 영향도 연구 중에 있다. 관심 있는 독자들은 웹 사이트와 (CERN RD8, RD48, RD50) 연구 프로젝트에서 최신 동향을 파악할 수 있다. [47]

내방사성물질에 대한 이번 연구의 주된 동기는 주로 고에너지 물리 실험을 하는 곳에서의 요청에 의한 것이며, CERN의 LHC와 독일의 International Linear Collider at the Desy laboratory에서 이루어 질 것이다. 게다가, 소모에너지원에 대한 수요의 증가 또한 이 연구를 독려하고 있다. 원자 에너지와 우주관련 응용을 위한 태양 방사선 변환이 미래의 주요 에너지원으로 될 것이기 때문에, 원자력 발전과 우주 기술 시스템의 안정성을 향상시키기 위한 노력이 내방사성 물질을 근간으로 이루어 져야

할 것이다.

내방사성은 주로 높은  $E_d$ (Threshold displacement energy)를 갖는 반도체나, 반절연물질이 큰 경향이 있다. 4H-SiC의  $E_d$ 값은 Si이나, GaAs 그리고 CdTe에 비해 1.5배 또는 그 이상 크며 다이아몬드 보다는 2배 정도 낮은 것으로 나와 있다. 게다가 단일 입자(양성자 또는 파이온) 또는 감마선에 의해 생성된 주방사선 결함은 Si, GaAs보다 상당히 낮고, 다이아몬드와는 비슷한 값을 보인다.[15]

$E_d$ 와 초기 결함의 개수 관점에서 본다면 SiC는 고온, 높은 방사선장이 있는 환경에서는 Si, GaAs, CdTe보다 더 뛰어난 성능을 보인다는 것을 알 수가 있다. 이러한 이론적인 예측은 세계 각지에서 SiC의 입자를 구분해 내는 능력, 검출기의 성능을 저하시키는 방사선에 의한 손상에 대한 연구를 하게끔 유도하였다. 이러한 연구의 결과물들은 다음 Section에 정리되어 있다.

헬륨 이온 입자의 4H-SiC, 6H-SiC에 대한 조사의 영향은 Dalibor 등에 의해 상세히 다루어져 왔다. 관찰된 방사성 결함의 인자들은 전자에 의해 조사된 SiC에서 발견되는 결함과 상당히 일치한다. 다양한 에너지와 선속을 갖는 전자를 이용한 더 심도 있는 실험이 진행되고 있다. 이러한 결함들의 일부에 대한 그럴듯한 구조가 광전자 스핀 공명에 의해 만들어졌다. [49]

결함관련 deep 레벨의 간극에서 존재함으로 인한 자유 전하 캐리어의 상당한 보충은  $9.5 \times 10^{14} \text{ e cm}^{-2}$  최대선속에서 8MeV 에너지의 전자에 의해 조사된 샘플에서 주로 관찰되었다. [50] 그러나 에너지와 선속에 상관없이, 조사에 의해 유도된 결함은 확산 형태의 소수 캐리어의 전하 수송을 제한하는 경향이 있다. 하지만 표류 형태에서의 수송과정에서는 그렇게 큰 중요성을 가지지 않는다. 완전히 공핍된 Schottky barrier 4H-SiC 검출기에 들어온 전리 방사선에 의해 생성된 전자 정공쌍은 검출기가 충분히 내방사성이 있다는 가정 하에 완전히 수집하게 된다. 이 현상은 높은 동작 전압( $50 \sim 100 \text{ kV cm}^{-1}$ )과 상대적으로 낮은 유도결함밀도 ( $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )모두를 고려할 때 설명될 수 있다. 전자와 정공이 SiC 검출기의 공핍층을 지나가는데 필요한 시간인 포화속도가 전자와 정공의 수명보

다 훨씬 짧다. [51, 52]

검출인자 뿐만 아니라 관찰된 방사선으로 인한 결함은 전자에 의해 조사된 SiC의 측정결과와 거의 일치한다. [48] 최근 F. Ruddy와 공동저자는 높은 방사능(22.72MGy)을 갖는  $^{137}\text{Cs}$ 선원을 이용해 4H-SiC를 조사한 후에  $^{238}\text{Pu}$ 선원에서 나오는 알파 입자에 대한 반응을 살펴보았다. 그들은 극도로 높은 감마선의 조사 이후에도 CCE값이 84% 정도로 잘 동작한다는 것을 확인했다.

양성자 중성자를 조사할 경우 높은 순도의 4H-SiC CVD 에피택셜층의 성질 및 다이오드를 사용할 경우 전하 수송 특성, 그리고 검출기로 이용할 경우 방사선 검출 인자에 대한 영향연구가 많이 수행되었다. 이렇게 많은 연구가 수행된 주된 이유는 4H-SiC가 기대와 달리 높은 선속의 양성자 중성자에 조사될 경우 성능이 저하되기 때문이다. 조사량과 입자의 에너지와 관계없이, 결함으로부터 초래되는 수송 특성, 전기적 특성 등이 전류-전압 측정, Capacitance-전압 특성과 같은 표준 절차를 이용함으로써 측정될 수 있었다. p+/n접합, Schottky 장벽 등으로 인식되기도 하는 4H-SiC다이오드의 방사선 검출 능력이 5.1에서 간략히 소개된 알파, 베타, x-ray를 이용한 핵계측 기술로 측정되었다. 이 측정 결과는 다른 곳에서 더 상세히 다루어지며 [53-55], 여기서는 최근에 나온 중요 결과만 소개하도록 한다.

양성자의 경우, 그들의 에너지와 선속은 다양한 범위를 갖는다. 각각  $6.5\text{MeV} \sim 24\text{GeV}$ ,  $10^{11} \sim 1.4 \times 10^{16} \text{p}\cdot\text{cm}^{-2}$  수준이다. 복잡한 분석과 자료들을 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(i) 방사선 결함의 인자들, 예를 들면 전리 에너지, 포획 단면적 및 구조 등은 전자에 의해 조사된 SiC에서 발견된 것들과 비슷하다. [51, 55]

(ii) 양성자의 에너지는 생성된 방사선 결함 구조에 극히 작은 영향을 미치지만 [54, 55], 가장 깊은 유도 결함의 introduction rate와  $n$ 에 상당히 큰 영향을 주고 있었다. 방사선속 에 대한 결함농도의 비로 정의되는  $n$ 는 양성자의 에너지가 감소할수록 증가했다. 이는 양성자의 에너지가 증

가할수록 Si과 C의 원자와 산란을 일으키는 양성자의 반응 단면적이 감소하기 때문이다. [56]

(iii) 에너지와 상관없이, proton fluence  $\Phi_p$ 는 deep-level 센터 농도  $N_d$ 와 소수 전하 캐리어 확산 길이  $L_m$ , 제거되는 전하운반자  $\xi$ , 전하 수집 효율 CCE와 같은 다양한 관련 인자들에 영향을 미친다. 현재는 어떤 deep level 센터가 위에 언급된 인자들을 컨트롤 하는지에 대한 일반적인 견해는 없지만, 6H-SiC, 4H-SiC 둘다  $L_m$ 과 CCE가 감소할수록  $\Phi_p$ ,  $N_d$ 가 증가하는 경향을 보여 왔다.  $\xi$ 는  $(n_0 - n)/\Phi$ 로 정의되고,  $n_0$ 와  $n$ 은 조사 전 후 자유 운반자 농도를 뜻한다.

(iv) 그럴듯한 구조가 양성자로 조사된 SiC polytype로부터 획득한 EPR 스펙트럼에 근거해 deep centres와 관련되어 왔다. 그리고 그 다음에, 결합이 photo sensitive일 때 그들의 전기적 특성과의 상호관계가 광전도 측정 방법에 의해 연구되었다. 8MeV 양성자의 조사에 의한 결과인 R Centre를 연구함으로써, Lebedev 등의 연구자들은[55], 이 centre가 빈공간( $V_c + V_{Si}$ )과 아주 밀접한 관련이 있음을 확신했다. 게다가 높은 에너지로 조사할 경우, 빈공간과 Frenkel 쌍의 격자사이 원자의 재결합 확률이 높아짐을 관찰할 수 있었다. 그로 인해 적은 수의 R centres가 형성된다. 검출기가 흑독한 방사선장에서 사용될 경우, 물질의 방사선에 대한 내성을 높이는 것은 아주 중요한 부분이기 때문에, 이 구조에 대한 정확한 확인과 위에 언급된 재결합에 대한 상세한 설명은 필수적이다. centre과 같은 것을 전기적으로 중화시킬 수 있는 적절한 불순물의 개발을 통해 더 높은 내방사성을 갖는 실리콘 카바이드를 만드는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

## 제5장 연구개발 동향

### 1절 해외 연구개발 동향

SiC 관련 연구개발은 크게 두 분야로 나뉘어 진행된다. Wafer 생산을 위한 단결정 성장기술분야, Epitaxy 성장기술을 포함한 device 기술분야로 구분되어 진행된다. 세계적으로 SiC를 집중적으로 연구 개발하는 국가는 미국, 스웨덴, 그리고 일본이다.

미국의 SiC는 NASA가 주축이 되어 연구를 주도하고 있으며, SiC가 활용가능한 모든 분야를 망라하고 있다. NASA는 20년 이상의 in-house 연구 경험을 보유하고 있으며, 최초의 대면적 SiC Epitaxy 성공, 최초의 수 kV SiC 정류기 시연, "site competition epitaxy"라 불리는 dopant control법 개발, micropipe가 SiC의 고전압 동작특성을 제한하는 원인임을 규명하는 등 수많은 업적을 보유하고 있는 SiC 분야의 독보적인 존재이다. 현재 미국내 SiC 관련 기업, 대학교 등에 연구 자금을 지원하는 창구 역할을 하고 있다.

이러한 배경에는 미국내 SiC의 잠재적 소비처가 형성되어 있음을 의미한다. 일례로 Westinghouse, Northrop GrummanMotorola, General Electric, Cree Research, Advanced Technology Materials, Inc., Kulite Semiconductor, Boston Micro Systems, Sienna Technologies, Spire Corporation 등이 있다. 기업 특성으로 보면 대전력 산업분야, 방위산업 분야, 그리고 반도체 산업분야 등이다. NASA와 함께 일을 추진하는 정부 연구기관은 US Air Force Research Laboratory를 비롯한 5개소에 이르며, 대학은 Purdue, Auburn 대학을 포함한 20여 곳, 기업은 Sterling Semiconductor, Litton Airtron, II-VI 등과 연관되어 있다.

Sweden의 경우도 미국처럼 잠재 수요자가 될 수 있는 기업인 ABB가 연구개발투자를 주도하였으며, 주요 대학으로는 Linkoping대학, Lund 대학, KTH(Kungl Tekniska Hogskolan, Royal Institute of technology) 등이 있다. SiC 제품을 개발하고 있는 회사로는 ACREO 등이 있다. 규모

면에서는 미국이나 일본에 뒤지지만 양질의 성과를 산출하고 있다.

일본은 양적인 면에서 미국에 비하여 규모는 적은 편이나, 근래 들어 관심이 높아지고 있는 추세이다. 일본제철(Nippon Steel)이 2 inch 크기의 4H-SiC, 6H-SiC 기판(substrate)을 상용화 정도까지 연구의 질을 높였고 (5 micropipe/cm<sup>2</sup> 미만), Epitaxy 성장 기술에서는 Kyoto 대학의 Matsunami 교수가 step-controlled epitaxy 성장법을 최초로 제안하였으며, epitaxy 성장법으로 보편화 되고 있는 추세이다. Device 측면에서도 작동되는 MOSFET을 구현하고 있다. 그러나 이러한 가지적 성과에도 불구하고 현 단계의 SiC의 시장규모가 협소한 이유로 정부로부터 R&D fund를 요구하고 있는 상황이다.

일본 정부로부터 연구 자금이 주어지는 SiC project는 대표적인 것으로 Hard Electronics Project, R&D on Combustion Control Systems for Energy Conservation, Control of Electronic Properties in Wide Gap Semiconductors, New Sunshine Project 등을 들 수 있다. 성격 면에서 Hard Electronics Project는 선행기술을 주로 다루는 project로 대부분의 일본 SiC 연구자들이 속해 있으며, 연구 자금 규모는 소규모로 preliminary 적인 성격이 있다. New Sunshine Project는 장기적인 국가 project이며, 전체 \$75 Million 규모의 연구자금이 소요되는 산학연이 참여하는 형태의 project이다. R&D on Combustion Control Systems for Energy Conservation Project는 성격상 특정한 용도를 목표로 하므로 참여가 제한적이고, The Ion Engineering Research Institute Corporation 이 project를 관리하며, 기업은 Nippon Steel, Matsushita Electric Industrial Company, Sanyo Electric Company, 그리고 Mitsubishi Electric Corporation 등 4개사, Kyoto 대학, Osaka 대학, Kyoto Institute of Technology 등을 포함하는 7개 대학이 관여한다.

Control of Electronic Properties in Wide Gap Semiconductors는 위의 project와는 달리 교육부에 의해 자금이 주어지고, 4명의 공식 member로 구성되며, Super high quality SiC 단결정 성장을 목표로 하는 특화된 목적의 project 이다.

## 2절 국내 연구개발 동향 및 전망

국내 동향은 1990년대 중반에 영도산업(현재는 없음)이 SiC 단결정 성장과제를 한양대학교와 함께 수행했으며, 서울대학교에서 Epitaxy 공정연구를 수행한바 있다. Device개발은 삼성전자 부천 공장에서 R&D 관심을 표명한 적이 있으나, IMF이후 Fairchild에 매각되었다. 과거 포항제철의 자회사 포스코 산전이 대전력 반도체(IGBT)의 방열 기관 소재로 DBC(direct bonded copper)기술 도입을 독일로부터 검토한 적이 있으나 추진되지 않았다.

산업자원부는 2003부터 고전압·고주파 전력용 소자개발에 필요한 실리콘 카바이드(SiC) 반도체 응용기술을 확보하고 시제품 제작에 본격 나섰다. 2003년부터 2004년까지 2년간 추진된 SiC반도체 개발 2단계 사업에 정부예산 28억4000만원을 포함, 총 46억5000만원을 투입했다.

특히 고전압 SiC 쇼트키 다이오드, 고주파 SiC FET 전력증폭 소자, SiC 단결정 성장 및 웨어퍼 제조기술 개발에 나섬으로써 고부가가치 핵심 소재의 국내 양산기술도 확보했다.

또한 동의대 SiC 웨이퍼 사업화팀은 전자세라믹스센터에 구축된 차세대 반도체 웨이퍼 제조 관련 장비 지원 및 기술지도를 받아 차세대 반도체 웨이퍼로 각광받고 있는 탄화규소(SiC) 반도체 웨이퍼 개발팀인 크리스밴드를 이끌고 있으며, 탄화규소 반도체 웨이퍼 상품화를 위해 노력하고 있다. 탄화규소 반도체 웨이퍼는 현재 미국 등 일부 선진국에서만 제조할 수 있으며, 국내에서 사용되는 것은 전량 수입에 의존하고 있어서 크리스밴드의 SiC 반도체 웨이퍼의 개발은 국산화를 통한 국내 부품소재 산업 발전에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

SiC 반도체 관련기술을 비교분석해 보면, 기본적으로 소자기술과 단결정·에피택시 기술에서는 기술 선두국가인 미국에 비하여 상당한 기술격차가 있는 것으로 평가되었다. 이것은 우리나라의 관련 기술개발 역사가 일천한데다가 최근까지도 체계적이고도 심층적인 연구를 위한 대규모 연구 투자가 이루어지지 않은 까닭으로 분석된다.

상대적으로 패키지 기술은 소자 기술에 비하여 기술 격차가 적은 것으로 평가되는데 이는 고온 고주파 패키지 기술의 일부는 기존의 패키지 기술과 공유가 가능하고 이들 기술 중 일부를 국내에서 보유하고 있기 때문으로 해석된다.

SiC는 고전압/대전력 스위칭 소자, 고온작동 소자 시장에서 Si 소자와 경쟁을 앞두고 있다. 그러나 시장경제 mechanism에서 자리 매김하기 위해서는 해결되어야 할 몇 가지 기술적인 문제를 갖고 있다. 대면적 양질의 결정 성장 기술, dopant 활성화, p-type 물질에의 ohmic contact 및 MOS interface 형성에 관련된 device 제조 기술 등이 이에 해당된다.

1990년대 중반 국내 화합물 반도체 관련 R&D는 GaN base 청색 LED 개발 일변도였다. 산업자원부의 집계에 의하면 1000억 이상의 fund가 GaN LED에 집중된 반면, 그와 유사한(혹은 상위의) 기술적 background를 필요로 하는 SiC에는 거의 전무한 상태였다. 그 당시 전 세계적으로 Wide band gap(WBG) semiconductor에 대한 관심은 무척 높았지만, 유럽 등 선진국에서는 WBG=GaN이라는 등식은 성립시키지 않았고, SiC, Diamond 등에 균형있는 fund를 투하하였으며, 우리나라는 GaN에 편중하였다. 그러한 결과로 SiC는 개발 참여자의 수나 fund 규모 면에서 실적을 기대할 만한 임계치에도 미치지 못하고 있다. 반면 GaN base 청색 LED 회사들은 원천 기술은 확보하지 못한 채, 시장 여건상 한계치 이상의 기업들이 난립하여, 지나친 경쟁으로 인한 많은 기업의 도산이 예상되고 있는 실정이다.

SiC 기술은 상용화된 device 양산기술 확보측면에서는 아직 미성숙 단계이다. 그러나 우리나라는 R&D 환경 확보측면에서도 미성숙 단계이다. SiC 물질 특성의 우수함에도 불구하고 기술 발전이 더딘 이유로는 시장이 아직은 작다는 것보다, 기술적 난이도가 높다는 편이 옳을 것 같다. 저급품 SiC substrate가 쓰일 수 있는 GaN 청색 소자기판은 단기간 내에 집중투자를 통하여 1~2개 회사를 시장에 진입시킬 기회가 될 수도 있다. 그리고 기술 개념이나 상품 개념이 명확해지고 있는 SiC 기술에의 투자를 고려하여야 할 것이다.

## References

- [1] Knoll G F 2000 Radiation Detection and Measurements 3rd edn (New York: Wiley)
- [2] Debertin K. and Helmer R. G., 1988 Gamma- and X-ray Spectroscopy with Semiconductor Detectors (Amsterdam: North-Holland)
- [3] Knoll G F and McGregor D. S., 1993 Proc. Material Research Society, Semiconductors for Room Temperature Radiation Detector Applications ed R B James, T E Schlesinger, P Siffert and L Franks vol 302 (Pittsburgh: MRS)
- [4] Fischetti M. V., 1991 Monte Carlo simulation of transport in semiconductors IEEE Trans. Electron. Devices 38 638-49 and references therein
- [5] Bruzzi M et. al., 2005 Radiation-hard semiconductor detectors for super LHC Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 541 189-201 and references therein
- [6] Lindstrom G et. al., 1999 Radiation hardness of silicon detectors—a challenge from high energy physics Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 426 1-15 and references therein
- [7] Smith K. M., 1996 GaAs detector status Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 383 75-80
- [8] Rogalla M. et. al., 1998 Radiation damage due to pions and protons in SI-GaAs and its influence on the detector performance Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 410 41
- [9] Nava F. et. al., 1998 Proton induced bulk damage effects in gallium arsenide detectors Nucl. Phys. B 61 432-7
- [10] Nava F. et. al., 1998 Analysis of uniformity of as prepared and irradiated SI GaAs radiation detectors IEEE Trans. Nucl. Sci. 45 609-16

- [11] Bourgoïn S. C. and Massarani B., 1976 Threshold energy for atomic displacement in diamond Phys. Rev. B 14 3690–4
- [12] Devanathan R. and Weber W. J., 2000 Displacement energy surface in 3C and 6H-SiC J. Nucl. Mater. 278 258–65
- [13] Malerba L. and Perlados J. M., 2003 Basic mechanisms of atomic displacement production in cubic silicon carbide: a molecular dynamic study Phys. Rev. B 65 045202
- [14] Lucas G. and Pizzagalli L., 2005 Comparison of threshold displacements energies in  $\beta$ -SiC determined by classical potentials and ab initio calculations Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 229 359–66
- [15] Lebedev A. A., Ivanov A. M. and Strokan N. B., 2004 Radiation resistance of SiC and nuclear radiation detectors based on SiC films Semiconductor 38 125–47 and references therein
- [16] Bertuccio G et. al., 2004 Silicon carbide for high resolution x-ray detectors operating up to 100 °C Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 522 413–9
- [17] Dullo A. R. et. al., 2003 The thermal neutron response of miniature silicon carbide semiconductor detectors Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 498 415–23 and references therein
- [18] Nava F et. al., 2006 Radiation detection properties of 4H-SiC Schottky diodes irradiated up to  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> by 1 MeV neutrons IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 2977–82
- [19] Strokan N. B., 2003 Detection of strongly and weakly ionizing radiation by triode structure based on SiC films J. Appl. Phys. 93 5714–9
- [20] Harris G. L., 1995 Properties of SiC (EMIS Datareviews vol 13) (London: The Institute of Electrical Engineers)
- [21] Rogalla M et. al., 1999 Particle detectors based on semi-insulating silicon carbide Nucl. Phys. Proc. Suppl. B78

516-20

- [22] Nava F et. al., 2004 Minimum ionizing and alpha particles detectors based on epitaxial semiconductor silicon carbide IEEE Trans. Nucl. Sci. 51 238-44
- [23] Moscatelli F. et. al., 2006 Radiation hardness after very high neutron irradiation of minimum ionizing particle detectors based on 4H-SiC p+/n junctions IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 1557-63
- [24] LPE <http://www.lpe-epi.com> AciS reactor
- [25] Nava F et. al., 2003 Investigation of Ni/4H-SiC diodes as radiation detectors with low doped n-type 4H-SiC epilayers Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 510 273-280
- [26] Manfredotti C et. al., 2003 Investigation of 4H-SiC Schottky diodes by ion and x-ray micro beam induced charge collection techniques Diamond Relat. Mater. 12 667
- [27] Bertuccio G., 2005 Prospect for energy resolving x-ray imaging with compound semiconductor pixel detectors Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 546 232-241 and references therein
- [28] Bertuccio G et. al., 2006 Possibility of sub-electron noise with room temperature silicon carbide pixel detectors IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 2421
- [29] Rogalla M et. al., 1997 Radiation studies for GaAs in the ATLAS inner detector Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 395 45-8
- [30] Bertuccio G et. al., 1997 Schottky junction on semi-insulating LEC gallium arsenide for x- and  $\gamma$  -ray spectrometers operated at and below room temperature IEEE Trans. Nucl. Sci. 44 117-24
- [31] Bertuccio G et. al., 1993 A method for the determination of

- the noise parameters in pre-amplifying systems for semiconductor radiation detectors Rev. Sci. Instrum. 64 3294-8 and references therein
- [32] Lo Giudice A et. al., 2005 Average energy dissipated by MeV hydrogen and helium ions per electron-hole pair generation in 4H-SiC Appl. Phys. Lett. 87 2221
- [33] Kinoshita A et. al., 2005 Radiation effect on pn SiC diodes as a detector Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 541 213-20
- [34] Vittone E et. al., 2005 Temperature dependent IBIC study of 4H-SiC Schottky diodes Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 231 491 and references therein
- [35] Ivanov A et. al., 2005 High energy resolution detectors based on 4H-SiC Mater. Sci. Forum 483-485 1029-32
- [36] Ruddy F H et. al., 2006 High-resolution alpha-particle spectrometry using 4H silicon carbide semiconductor detectors IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 1713-8
- [37] Strokan N. B., 2005 The limiting energy resolution of SiC detectors in ion spectrometry Semiconductor 39 1420-5
- [38] Dubbs T et. al., 1999 Development of radiation-hard materials for microstrip detectors IEEE Trans. Nucl. Sci. 46 839
- [39] The RD42 collaboration (CERN) 2002 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 476 686
- [40] Ruddy F. H. et. al., 2003 Fast Neutron Spectrometry Using Silicon Carbide Detectors ed J Wagemans, H A Abderrahim, P D'Hondt and C DeRaedt (Singapore: World Scientific)
- [41] Dulloo A. R. et. al., 1998 Simultaneous measurements of neutron and gamma-ray radiation levels from TRIGA reactor core using silicon carbide semiconductor detectors Nucl. Sci. Symp. 3 2136
- [42] Manfredotti C. et. al., 2005 SiC detectors for neutron

- monitoring, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 552 131
- [43] Lo Giudice A. et. al., 2007 Performances of 4H-SiC Schottky diodes as neutron detectors Nucl. Instrum Methods Phys. Res. A 583 177-80
- [44] Bertuccio G. et. al., 2003 Study of silicon carbide for x-ray detection and spectroscopy IEEE Trans. Nucl. Sci. 50 175
- [45] Philips B. F. et. al., 2005 Silicon carbide PIN diodes as radiation detectors IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record 34-6 1236
- [46] Lindstroem G., 2006 The WODEAN project Workshop on Defect Analysis 1st meeting (Hamburg, Germany, August 2006)
- [47] [www.lerc.nasa.gov/www/SiC.htm](http://www.lerc.nasa.gov/www/SiC.htm) and [www.ifm.liu.se/katephys/new.page/research/SiC/index.html](http://www.ifm.liu.se/katephys/new.page/research/SiC/index.html)
- [48] Nava F. et. al., 2003 Radiation tolerance of epitaxial silicon carbide detectors for electrons, protons and gamma rays Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 505 645-55
- [49] von Bardeleben H. J. et. al., 2000 Vacancy defects in p-type 6H-SiC created by low-energy electron irradiation Phys. Rev. B 62 10841
- [50] Cavallini A. et. al., 2004 Low temperature annealing of electron irradiation induced defects in 4H-SiC Appl. Phys. Lett. 85 3780
- [51] Castaldini A. et. al., 2005 Deep levels by proton and electron-irradiation in 4H silicon carbide J. Appl. Phys. 98 53706
- [52] Nava F et. al., 2001 Charged particle detection properties of epitaxial 4H-SiC Schottky diodes Mater. Sci. Forum 353-356 757-61
- [53] Lebedev A. A. et. al., 2000 Deep centers appearing in 6H and 4H SiC after proton irradiation Mater. Sci. Forum 338-342 973

and references therein

- [54] Ivanov A. M. et. al., 2001 Radiation hardness of SiC ion detectors under relativistic protons Semiconductors 35 481–4
- [55] Lebedev A. A. et., al., 2000 Doping of n-type 6H-SiC and 4H-SiC with defects created with a proton beam J. Appl. Phys. 88 6265 and references therein
- [56] Davidov D V et. al., 2001 Positron annihilation in AlN and GaN Physica B 308 110–3



서 지 정 보 양 식

|   |                 |   |              |            |       |
|---|-----------------|---|--------------|------------|-------|
| 서 지 정 보 양 식   |                 |   |              |            |       |
| <b>수행기관보고서번호</b>  |                 | 위탁기관보고서번호   |              | 표준보고서번호    |       |
| KAERI/AR-855/2010   |                 |   |              |            |       |
| <b>제목 / 부제</b>  |                 | 탄화규소 반도체 방사선 센서 기술 동향 분석                          |              |            |       |
| <b>연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)</b>  |                 | 박세환, 원자력융합기술개발부                                   |              |            |       |
| <b>연구자 및 부서명</b>  |                 | 이철호, 하장호, 김한수                                     |              |            |       |
| 원자력융합기술개발부  |                 |   |              |            |       |
| <b>출판지</b>  | 대한민국            | <b>발행기관</b>                                       | 한국원자력연구원     | <b>발행년</b> | 2010  |
| <b>페이지</b>  | p.73            | <b>도표</b>   | 있음(◆), 없음( ) | <b>크기</b>  | 27 cm |
| <b>참고사항</b>   |                 |   |              |            |       |
| <b>공개여부</b>   | 공개(◆), 비공개( )   |   | <b>보고서종류</b> | 기술현황분석보고서  |       |
| <b>비밀여부</b>   | 대외비( ), ___ 급비밀 |   |              |            |       |
| <b>연구위탁기관</b>   |                 |   | <b>계약번호</b>  |            |       |
| <b>초록 (15-20줄내외)</b>  |                 |   |              |            |       |
| <p>탄화규소는 실리콘과 탄소의 큰 결합에너지로 인해 화학적, 물리적으로 안정적이며, 650℃의 고온에서도 동작이 가능하여 기존의 반도체 응용분야를 대체할 물질로 각광받고 있다.</p> <p>본 보고서는 세계 탄화규소 반도체 방사선 센서 연구 동향을 분석하여 국내 탄화규소 기반 반도체 방사선 센서 연구개발 방향을 제시하고자 한다. 탄화규소 반도체의 구조와 전기적 특성에 대해 기술하였으며, 센서 제작을 위한 에피층 성장 및 접합 기술에 대해 기술하였다. 하전-비하전입자에 대한 탄화규소 반도체 센서의 검출 특성과 방사선 조사로 인해 생기는 반도체 센서의 방사선노화 특성을 포함하고 있다.</p> |                 |   |              |            |       |
| <b>주제명키워드 (10단어내외)</b>  |                 | 탄화규소, 탄화규소 방사선 센서, 탄화규소 방사선센서 기술동향, 결정 구조, 방사선 노화 |              |            |       |

| BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET                       |                                  |  |                |                     |                     |                   |  |
|---|----------------------------------|--|----------------|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| Performing Org.<br>Report No.                         |                                  | Sponsoring Org.<br>Report No.  |                | Standard Report No. |                     | INIS Subject Code |  |
| KAERI/AR-855/2010                                     |                                  |  |                |                     |                     |                   |  |
| Title / Subtitle                                      |                                  | Analysis of Technology Trend on a SiC Semiconductor Radiation<br>Sensor  |                |                     |                     |                   |  |
| Project Manager<br>and Department<br>(or Main Author) |                                  | Se Hwan Park<br>Nuclear Technology Convergence Division  |                |                     |                     |                   |  |
| Researcher and<br>Department                          |                                  | Cheol Ho Lee, Jang Ho Ha, Han Soo Kim<br>Nuclear Technology Convergence Division   |                |                     |                     |                   |  |
| Publication<br>Place                                  | Korea                            | Publisher  | KAERI          |                     | Publication<br>Date | 2010              |  |
| Page  | p.73                             | Ill. & Tab.  | Yes(◆), No ( ) |                     | Size                | 27 cm             |  |
| Note  |                                  |  |                |                     |                     |                   |  |
| Open  | Open( ◆ ), Closed( )             |  | Report Type    |                     | State of art report |                   |  |
| Classified  | Restricted( ), ___Class Document |  |                |                     |                     |                   |  |
| Sponsoring Org.                                       |                                  |  |                | Contract No.        |                     |                   |  |
| Abstract (15-20 Lines)                                |                                  | <p>Silicon carbide(SiC) is a promising semiconductor materials by virtue of its chemical and physical stability due to high binding energy of silicon and carbon.</p> <p>This report is for suggestion of domestic research direction based on SiC semiconductor radiation detector by analysis of technological trend on world SiC semiconductor radiation detector research. Crystalline structure and electrical characteristics of SiC semiconductor are presented. To fabricated a SiC semiconductor radiation detector, epitaxial growth and junction technologies are also addressed. Characteristics of a SiC semiconductor radiation detector for charged/uncharged particles are analyzed. Radiation hardness of a SiC semiconductor radiation detector are also included.</p> |                |                     |                     |                   |  |
| Subject Keywords<br>(About 10 words)                  |                                  | Silicon Carbide(SiC), SiC radiation sensor, SiC semiconductor technology trend, crystalline structure, radiation harness   |                |                     |                     |                   |  |