

# I 탄화규소기반 방사선 검출기 기술 동향

하 장호 선임연구원  
(한국원자력연구소 미래원자력기술개발단)

## 1. 서론

1970년대부터 다양한 반도체를 이용한 방사선 검출기 연구가 시도되었다. 특히 에너지 분해능이 우수하며, 상온에서 별도의 냉각장치 없이 사용가능하고, 응답속도가 매우 빠르며, 방사선 검출효율이 우수하고 대면적으로 제작 가능하고 방사선에 내구성이 강한 재료에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재까지는 Si 반도체가 기술측면에서는 놀라운 발전을 보여주고 있고 감마선 고분해능의 경우 Ge 반도체가 우수하지만 두 반도체 모두 상온에서 분해능이 나쁜 단점이 있다.

기존 반도체 검출기의 한계를 극복하기 위한 대안으로 광대역 반도체 검출기가 대안으로 제시되고 있다. 고온 고방사선 환경에서 사용가능한 전자 소자를 구현하기 위해 여러 가지 화합물 반도체가 연구되고 있으며, 차세대 반도체 소자 재료로서 탄화규소(SiC), GaN, AlN, BN, ZnO 등의 광대역 반도체 재료가 많이 연구되고 있다. 광대역 반도체는 에너지 밴드 간격이 약 2eV 이상의 넓은 값을 갖는 반도체 재료를 뜻하며(그림1), 물리 화학적으로 안정하므로 고온 환경에서 대전력 소자나 내방사성소자로서 활용될 수 있어 응용영역은 매우 방대하다. 광대역 반도체 중 현재 단결정

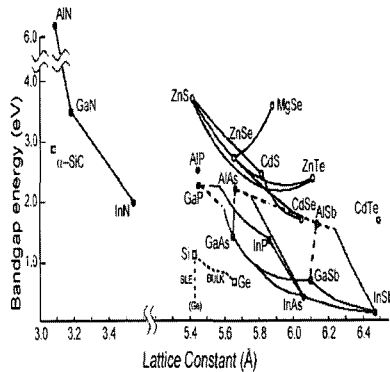


그림 1. 반도체 재료의 결정격자 간격 대비 밴드간극.

성장 기술이 확보되어 웨이퍼로서 생산되는 것은 탄화규소 재료 밖에 없다.

웨이퍼의 공급이 상용화됨에 힘입어 탄화규소다이오드를 차세대 방사선 검출기로 사용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 알파선과 같은 전하입자나 중성자, 감마선을 측정하여 원자로나 핵물질을 다루는 고방사선 시설에서 방사선을 측정 및 감시 또는 핵분광학 분야, 환경감시 분야에 적용을 목적으로 집중 연구되고 있다. 고온의 원자로 내부에서는 내방사성 특성의 재료가 필수요소이며 탄화규소는 기존 반도체 공정을 도입할 수 있으면서도 고방사선의 환경에서도 안정한 물질로 평가되고 있어 집중적으로 연구되는 재료이다.

## 2. 본 론

### 2.1 탄화규소 단결정 구조

탄화규소 단결정은 규소과 탄소가 1:1로 결합되어 있으며 기본 구조는  $sp^3$  혼성 궤도에 의한 사면체(Tetrahedron) 구조이다. 규소와 탄소는 80% 이상이 공유 결합을 하고 있으며, 나머지가 이온 결합을 하는 것으로 알려져 있다. 탄화규소는 200여 가지의 결정상이 알려져 있으며 이중 대표적으로 방사선 검출기로 사용되는 것은 현재 단결정 상용화가 가능한 3C, 6H, 4H-SiC 등 3가지이다. 표1은 방사선 센서 재

료로 주목받는 주요 반도체의 물성을 정리하였다. 탄화규소의 경우 결정구조에 따라 밴드 간격 에너지가 다소 차이는 있지만 3 eV로 매우 높으며 포화전압도 매우 높아 열이나 전기적 노이즈에 강하다.

### 2.2 탄화규소의 장점과 이용 분야 및 시장

반도체 재료로서의 탄화규소는 우수한 물질 특성을 갖고 있는데 기계적 강도는 모스경도가 9 정도로 매우 높아 사포의 연마재로 사용되고 있다. 특히 절연파괴 전계가  $3 \times 10^6$  V/cm로 Si의 약 10배, 전자 포화 속도가  $2 \times 10^7$  cm/s로 Si의 약 2배로 고전압 전력소자로서의 사용 가능성이 집중 연구되고 있다. 4.6 W/cm<sup>2</sup> 정도의 큰 열전도도를 가지고 있고 1,500 °C - 2,000 °C에서도 결정에 따라서는 열적 안정성이 우수하여 화염센서, 방화복 섬유나 우주선에 사용되고 있다. 또한 고산화성 분위기에서의 화학적으로 안정성도 뛰어나 수소 생산용기의 내벽코팅제로 사용되고 있으며, 가장 많이 사용되는 분야는 Si 반도체 생산라인의 공정부재인 더미웨이퍼이다. 새로운 소자로 전원 공급 장치 제작 분야, 통신 분야, 자동차 분야에서 많은 관심을 받고 있다[1,2].

탄화규소 단결정 웨이퍼는 세계 생산량의 94%를 미국이 독점적으로 제공하고 있는 고부가가치 분야이다. 또한 탄화규소 시장의 85% 이상을 미국의 Cree회사가 제공하고 있다. 최근에는 Okmetic, Hoya, Soitec 등 일본회사가 새로운 기술로 탄화규

표 1. 탄화규소를 포함한 방사선 센서용 반도체 재료 물성.

Property	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	Ge	Si	GaAs	CdTe	Cd <sub>0.9</sub> Zn <sub>0.1</sub> Te	HgI <sub>2</sub>	Diamond
E <sub>g</sub> (eV)	2.2	3	3.26	0.67	1.1	1.43	1.5	1.7	2.15	5.45
E <sub>c</sub> (10 <sup>5</sup> V/cm)	12	24	20	1	3	6	/	/	/	100
μ <sub>n</sub>	1000	370	1000	3900	1500	8500	1000	1000~1100	100	2200
μ <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /Vs)	50	50	50	1900	600	400	420	~50	4	1600
N <sub>i</sub> (cm <sup>-3</sup> )	6.9	2.3×10 <sup>-6</sup>	8.2×10 <sup>-6</sup>	2.4×10 <sup>13</sup>	1.4×10 <sup>10</sup>	1.8×10 <sup>6</sup>	6.9×10 <sup>4</sup>	/	/	1×10 <sup>-20</sup>
λ <sub>th</sub> (W/cmK)	4.9	4.9	4.9	0.6	1.5	0.46	0.06	/	/	22
V <sub>sat</sub> (10 <sup>7</sup> cm/s)	2	2	2	0.6	1	1.2	/	/	/	2.7
ε <sub>r</sub>	9.6	9.7	10	16	11.8	12.8	10.9	/	8.8	5.5
Z	14/6	14/6	14/6	32	14	31/33	48/52	48/30/52	80/53	6
ρ (gr/cm <sup>3</sup> )	3.2	3.2	3.2	5.33	2.33	5.32	6.2	~6	6.4	3.5
e/h pair energy (eV)	/	/	7.8	2.96	3.62	4.21	4.43	~5 (20% Zn)	4.2	13

소 시장을 확보하기 위하여 경쟁 중이며, 국내에서는 토카이카본 합작회사에서 다결정을 생산하고 있으나 단결정은 생산되고 있지 못한 실정이다.

국내시장 규모는 탄화규소 관련시장은 2,400억 원 정도 형성되어있으며 60 %가 전력소자, 20 % 단결정, 나머지 20%는 발광 및 고온 소자 분야로 구성되어 있다. 보통 탄화규소 최종 제품의 생산 비용은 다음과 같다. 보통 센서나 소자 제작비는 순 재료가 총 비용의 40 %, 제작 공정에 50 %, 그리고 최종 패키징이나 특성검사에 10%정도 소요된다. 그러므로 가공 기술의 개발만으로도 고부가가치를 실현할 수 있는 분야이다.

### 2.3 탄화규소 방사선 센서

Si 기반의 방사선 검출기는 상업적으로 판매를 하고 있으나, 상온에서 사용할 경우 노이즈가 크다. 원자로 환경인  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>의 중성자 선량에서, 사용 온도는 300-800도 정도에서도 동작하여야 한다[3]. Bulk 탄화규소 센서의 경우  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>의 중성자 선량에서 사용가능하다고 알려져 있다[4]. 하지만 불균질하고 불순물이 포함되는 단결정 성장과 제작 과정이 어려운 점이 기술적인 한계이다. 이러한 문제는 노이즈와 Charge Collection 효율, 분해능의 저해와 깊은 관련이 있다.

원자력 산업에서 가장 큰 시장은 원전시장이며 원전내부와 외부의 중성자와 감마선 측정을 통한 원전의 운영과 감시가 날로 중요시되고 있다. 그림2는 대단위 중성자와 감마선 시설에서 감마선과 중성자의 선량을 도식화 한 것으로 기술 개발로 이루어져야 할 방사선량 영역이다. 감마선의 경우  $10^9$  krad-Si/h의 고선량과 중성자의 경우  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>/sec의 최고선량을 보여주고 있다.

최근 진행 중이 탄화규소기반 방사선센서의 기술 개발 방향은 초기단계로 연구용 원자로에 실험을 목적으로 연구 개발되고 있다. 원자로 환경에서는 외부로부터 전원 공급하기가 어렵고 장착할 수 있는 장치가 매우 작으므로 초소형이면서 외부의 인가전압이 없이 동작할 수 있는 검출기 개발을 목표로 하고 있다. 또한 원자로는 최소 내부 온도가 300도 이상이므로 고온에서 노이즈와 물성이 강한 탄화규소를 이용한 연구가 집중적으로 추진되고 있다.

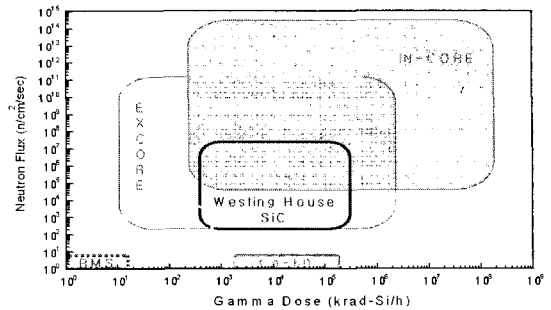


그림 2. 원자로를 포함한 대단위 조사시설에서 감마선과 중성자의 발생분포영역. In-, ex-core는 원자로의 노심과 노외, Co-60은 대단위 감마선 조사시설, SF는 사용후 핵연료 저장시설, RMS는 환경방사선 감시, westing house SiC는 웨스팅하우스사에서 기술개발을 수행한 영역을 의미한다.

### 2.4 탄화규소 방사선 센서 구조적 특성

탄화규소 단결정을 이용한 쇼트키 다이오드는 주로 두 가지 형태로 연구되고 있다. 한 가지는 Bulk형 쇼트키 다이오드이고, 다른 하나는 에피층을 형성한 쇼트키 다이오드이다. Bulk형의 경우 주로 Semi-insulating과 n-형 웨이퍼를 기반으로 제작되고 있다.

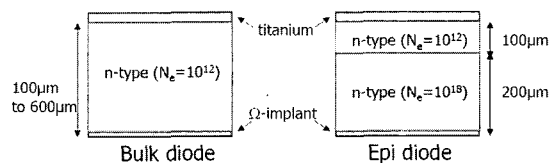


그림 3. 탄화규소의 두 가지 일반적인 구조 형태. Bulk형과 Epi형 쇼트키 다이오드의 구조 예.

Bulk 다이오드 구조는 옴 특성의 전극을 가지는 300 µm 두께의 Semi-insulating 탄화규소 검출기가 연구되었는데, 500 V의 구동전압에서 12 %의 Sr-90의 베타선 검출 효율을 보였다. 더욱이 수십분이 경과된 후에도 잔류전하가 큰 것으로 알려졌다. 이러한 결과는 단결정내의 결함과 불순물에 의한 전하의

흡수에 기인하는 것으로 밝혀졌다.

이러한 잔류 전류 현상 한계를 극복하기 위하여 최근에는 주로 연구되는 탄화규소 방사선 검출기 형태는 수 백  $\mu\text{m}$ 의 n-형 기판위에 3-8  $\mu\text{m}$ 의 Epitaxial 층을 형성하는 쇼트키다이오드를 제작하는 것이다. 주로 4H-SiC 기판을 사용하고 있으며, Epitaxial층은 CVD공정을 통해서 형성한다. 특히 상업용으로 판매되는 4H-SiC (0001)기판 중 8도 정도 <1120> 방향으로 기울어진 단결정을 사용한다. 이 경우 결정 순도가 매우 높아 전하의 흡수가 적고 효율이 높을 뿐 아니라 Sr-90의 베타선 검출 효율이 거의 100%에 이르는 것을 알려져 있다[5,6].

### 2.5 탄화규소 검출기 제작 공정

탄화규소 주요 공정은 웨이퍼의 연마, 절단, 에칭, 금속전극, 패키징 등이 있다. 일반적으로 센서제작 공정에는 4H-SiC 단결정 웨이퍼가 사용된다.

한 예로 Cree社에서 제공하는 단결정 웨이퍼를 주로 사용하는데, 지름 2"에 두께 360  $\mu\text{m}$ 이며 Dopant로는 질소를 사용하여  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  도핑한 것을 사용하여 제작한다. 웨이퍼는 표준적인 세척과정을 거쳐서 웨이퍼 표면의 유기물을 제거한다. 이 때 사용되는 세정제로는 뜨거운 황산과 과산화수소수용액이나 염산과 과산화수소를 희석한 용액 두 가지가 주로 사용된다. 중간 세척과정에는 순수를 사용한다. 이러한 과정에서는 산화층이 형성되는데 산화층 제거는 건식에칭을 하거나 희석한 불산을 사용한다. 실제적으로 탄화규소는 화학적으로 내구성이 우수하므로 에칭이 어렵다. 표면에 전하를 인출하는 전극의 형성은 전자총이나 열증착기를 이용하여 다층의 박막을 형성한다. 주로 많이 사용되는 전극 구조로는 쇼트키 다이오드 경우 한 면은 Ni/Au의 쇼트키장벽층을 다른 면은 Ti/Pt/Au의 옴 층을 형성하여 방사선에 의해 생성된 전하를 인출한다. 웨이퍼 상에 전극까지 형성된 다수의 센서는 Dicing saw를 이용해서 절단하여 제작한다. 절단 후 금이나 백금의 전선을 이용하여 Wiring하고 패키징을 수행하여 최종 검출기를 제작한다.

제작된 방사선 검출기의 특성은 크게 두 가지 검사를 수행한다. 전기적 특성과 방사선 특성이다. 전기적 특성의 경우 XRD나 알파스텝을 이용하여 표

면이나 전극 물성을 검사하고, I/V와 C/V 측정을 통하여 누설전류와 쇼트키 장벽의 높이, 밴드 갭 등을 측정한다. 방사선특성은 방사선원을 이용하여 전하의 검출효율을 측정한다.

### 2.6 탄화규소 방사선 센서의 특성

Si와 Ge 중심으로 제작되던 방사선 검출기는 최근 CdTe, CdZnTe와 같은 상온반도체를 이용한 검출기 제작 방향으로 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 고온, 고선량의 극한 환경에서 동작할 수 있는 탄화규소를 이용한 방사선 검출기에 대한 관심도 높아지고 있다.

탄화규소에 기존 Si 반도체 기술을 적용하여 초소형의 센서를 제작하여 특성을 연구하고 있으며 주요 관심 분야는 고온용 X-선과 중성자 방사선 센서이다. 그림4는 제작된 16개의 탄화규소 센서이다. 기본적인 공정은 Si 반도체 공정과 비슷하며 에칭부분에 사용되는 용액만 차이가 있다.

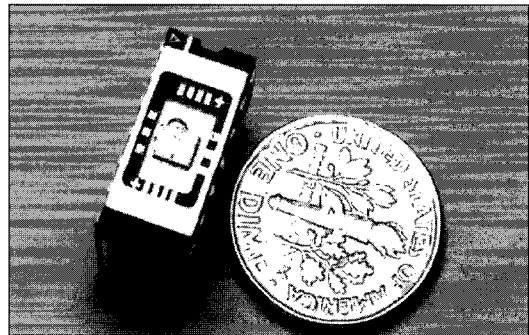


그림 4. 초소형 4x4 탄화규소 센서.

#### 2.6.1 감마선/X선 반응도

감마선/X-선에서는 GaAs, CdTe, CdZnTe, Hg12 검출기가 상온에서도 에너지 분해능이 우수한 것을 알려져 있다. CdZnTe 경우 상온에서 감마선 분해능은 Ge 분해능과 NaI(Tl) 검출기 분해능의 중간이며 Peltier 냉각소자로 영하 30도가량 냉각할 경우 Ge 분해능을 보이는 것으로 알려져 있다[7,8].

CdZnTe의 우수한 감마선 특성에도 불구하고 대형의 단결정을 만들기가 어려우며 소재자체도 기계적 강도가 떨어지는 단점이 있어 원자력 환경과 같

이 극한 환경에서 사용이 어려운 점이 있다.

감마선 검출기는 일반적으로 원자의 Z수가 큰 물질이 유리한데, Z 수가 클수록 감마선의 저지능이 커지기 때문이다. 탄화규소는 Z가 크지는 않지만 저지능이 문제가 되지 않는 X-선 영역 경우 탄화규소 검출기는 상온을 넘어서는 온도에서 동작할 수 있다는 장점이 있다. 현재까지 100도 이하에서 안정적으로 동작하는 것으로 알려져 있고 또한 고온에서 반도체 검출기 중에는 가장 적은 누설전류밀도를 가지는 것으로 보고되고 있다. 더욱이 별도의 냉각 없이 동작시킬 수는 특성은 다른 반도체 검출기에 비해서 전력으로 동작이 가능하고, 작은 크기로 제작할 수 있어 원자로나 인공위성 등 제약조건이 많은 환경에서 사용하기 적합한 우수한 특성을 가지고 있다. 최근 탄화규소를 이용한 X-선 검출기의 분해능은 59.5 keV에서 2.7 keV까지 분해능이 향상된 결과가 보고되었다[9].

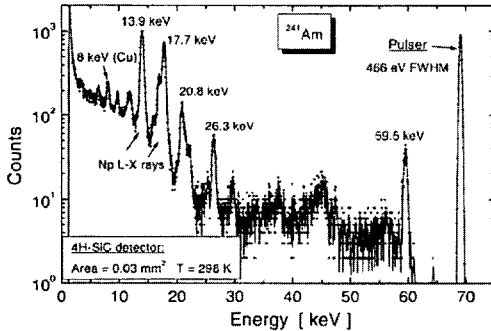


그림 5. 4H-SiC 검출기를 이용하여 Am-241에서 발생한 X-선 측정 스펙트럼.

## 2.6.2 탄화규소 중성자 검출기

탄화규소 중성자 검출기는 Si 반도체 검출기와 같이 상용화된 검출기보다 탁월한 성능을 보여주고 있다. 무엇보다 방사선에 강한 특성과 고온에 강하여 원자로 노심과 같이 고온의 환경에서 사용이 가능하기 때문이다. 현재 원자로의 노심의 중성자 출력은 로듐(Rh-103)이란 물질을 방사화하여 원자핵 붕괴과정 얻어지는 베타선, 즉, 전자선을 측정하여 중성자 발생을 측정하여 원자로의 출력을 제어하고 있

다. 이러한 방식은 큰 전류를 얻을 수 있고 내구성이 우수한 장점이 있으나 베타선으로 붕괴하는 시간이 42초 이상 소요되어 실시간으로 원자로 노심의 중성자 출력 분포를 알기 어려운 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하고자 기체기반의 핵분열함을 제작하여 장착하는 연구를 수행하고 있지만 기체형의 경우 소형으로 제작하기 어려운 단점이 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 대안으로 광대역 반도체 기반의 중성자 검출기가 제안되고 있다. 미국의 웨스팅하우스사에서 가장 선도적으로 개발되고 있으며 연구용 원자로인 TRIGA에서 일부 실험이 수행되었다. 원자로에서 300 W이하의 출력을 발생하여 생성된 중성자를 측정된 결과 낮은 원자로 출력에서는 원자로의 출력대비 중성자 측정수의 선형성이 1% 내로 우수한 것으로 보고되었다. 중성자가 발생하는 모든 곳에서는 필연적으로 감마선이 동시에 발생하는 문제가 있다. 이러한 문제는 중성자의 배경 간섭으로 나타나는데 Xe 기체검출기를 이용한 감마선의 원자로 열출력에 대한 증가 정도에 비하여 탄화규소 기반 검출기는 증가정도가 둔감하고 중성자에 대해서는 예민한 특성을 보여주었다. 또한 감마선에 둔감하여 검출기에서 축적되는 전하량이 감마선과 중성자에 따라 큰 차이를 보여주고 있어 쉽게 에너지 스펙트럼 상에서 구분되어진다. 이러한 특성은 기체검출기 보다 우수한 중성자 측정 가능성을 보여주었다.

탄화규소 검출기 구성물질인 Si나 C가 중성자에 민감한 물질이 아니므로 중성자에 반응하는 검출기를 제작하기는 어렵다. 대부분 반도체를 이용한 검출기는 중성자를 전하를 가진 높은 에너지 입자로 전환하는 중성자 전환 고체박막을 전극표면에 증착하여 사용한다. 주로 사용되는 전환박막으로는 중성자 반응단면적이 매우 큰 Li-6, B-10 이 가장 많이 사용되고 있는데, 이는 중성자가 반응하여 높은 에너지의 알파선이나 삼중수소 등을 발생시켜 금속전극을 투과하여도 많은 에너지를 반도체 안에서 전달하여 전류로 변환되기 때문이다.

현재 원자로 적용을 목적으로 방사선 검출기는 우선적으로 알파선에 대한 반응을 최대화하는 방향으로 연구를 수행하여, 최종적으로 전환박막을 추가

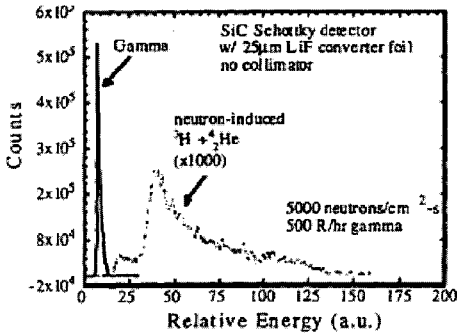


그림 6. 원자로에서 얻어진 LiF 전환박막을 장착한 탄화규소 쇼트키 검출기의 에너지 스펙트럼. 감마선과 중성자에 의한 효과가 구분된다.

함으로써 최적화된 중성자 검출기를 완성한다. 알파선 검출용 탄화규소 쇼트키 검출기 경우 보통 20V 정도의 동작전압에서 구동하게 되는데 이 정도 동작전압이면 Pu, Am에서 발생하는 5.5 MeV 알파선을 흡수하여 전하수집효율 100%를 얻을 수 있는 충분한 공핍층을 형성하기 때문이다. 일반적으로 20V까지 증가함에 따라 에너지 분해능 좋아지다가 전하수집효율이 100%되는 동작전압에서 분해능이 포화되는 경향을 보여주고 있다.

LiF 박막을 장착한 탄화규소 검출기의 중성자 반응성은 열중성자 선량이  $1.76 \times 10^4$ 에서  $3.59 \times 10^{10}$  n/cm/s 인 조건하에서 매우 선형적이라는 연구 결과가 보고되고 있다. 중성자 출력  $10^{16}$  n/cm/s 정도에서 수행된 연구에서는 중성자의 입사량이 증가할수록 검출된 전류량이 줄어드는 현상을 보여주었다. 이러한 현상은 중성자에 의한 탄화규소 재료의 피로도로 이해할 수 있는데, 중성자 조사에 의해 생성된 결정결함이 생성된 캐리어 전하의 일부를 흡수하여 최종적으로 금속전극에서 집속되는 전하를 줄여들게 하여 얻어지는 전류가 줄어드는 것으로 이해할 수 있다. 하지만 원자로의 운영요건은 지구상에 존재하는 가장 극단적인 중성자 환경에서도 운영이 가능하다는 가능성을 보여줌으로 향후 탄화규소기반 중성자 검출기가 곧 실용화 될 것이라고 예상된다.

### 2.7 국내 연구동향

국내 탄화규소의 연구방향은 주로 전력소자 중심

으로 연구가 진행 중이며 방사선 검출기는 원자력 연구소에서 탄화규소기반 차세대 원자로 노의 검출기술을 개발 중에 있다. 주요 구조는 Bulk한 쇼트키 다이오드를 개발 중에 있다.

아직까지 국내 방사선 검출기술의 개발이 초보적인 수준이기는 하지만 국내의 우수한 반도체 기술을 적용하여 급속도로 개발이 진행되고 있다. 우선적으로 국내에서 탄화규소를 포함한 공정을 개발하기 위하여서는 반도체 공정을 수행할 수 있는 연구시설이 절대적으로 필요하다. 또한 원천 기술의 확보를 위해서는 고가인 단결정의 성장 기술의 자립이 무엇보다 중요하며, 광대역 반도체 공정 기반 시설이 조속히 설치되어 이 분야 연구가 활성화되기를 희망한다.

### 3. 결론

광대역 반도체의 극한환경에 대한 요구와 반도체 기술의 저변 확대에 힘입어 반도체 기반 방사선 센서기술이 날로 발전하고 있다. 특히, 탄화규소 웨이퍼의 상용화에 힘입어 다양한 방사선에 대한 고온용 검출기술이 활발히 개발 중에 있다. 특히, 원자로에 적용을 목적으로 연구가 진행되고 있으며 X-선 검출기로도 온도에 따른 특성이 우수한 것으로 알려져 있다. 향후 탄화규소는 Si 반도체를 대체할 수 있는 가능성이 모색되고 있으며 내열성, 내화학성, 내방사성 등 매우 우수한 재료로 평가받고 있다.

아직까지는 기존 Si 반도체를 대체할 목적으로 대 전력 소자와 주변 분야로 시장이 확대되고 있다. 단결정 시장은 미국이 독점하고 있는 실정이며, 국내 기술 개발이 시급한 고부가가치 분야이다. 국내에서도 탄화규소를 이용한 방사선 반도체 기술이 미흡하나마 시작 되고 있어 향후 원자력시장의 커짐과 더불어 방사선 계측기 분야의 수요 증가할 것으로 전망되며, 특히 탄화규소 검출기는 향후 보안 검색장치 시장, 우주 항공 산업분야의 방사선 영상검출장치 등으로 활용이 확대될 전망이다.

## 참고 문헌

- [1] Silicon Carbide High Temperature Integrated Electronics and Sensors. Available: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/SiC.html>, BERTUCCIO AND CASIRAGHI: STUDY OF SILICON CARBIDE FOR X-RAY DETECTION AND SPECTROSCOPY, 185.
- [2] Trans. Electron Devices, Vol. 46, 1999(dedicated to silicon carbide).
- [3] R.V. Babcock and H.C. Chung, Neutron Dosimetry 1, IAEA SRI/PUP/69 Vienna Vol. 1, p. 613, Proc. of the Sym. on Neutron Detection, Dosimetry and Standardization, IAEA, 1962.
- [4] V.A. Tikhomirova, O.P. Fedoseeva and V.V. Bolshakov, Izmeritel' naya Tekhonika No. 6, p. 67, 1973 .
- [5] F. Nava, G. Wagner, C. Lanzieri, P. Vanni, E. Vittone, Nuclear Instrument and Method in Physics Research, A 510, p. 273, 1999.
- [6] F. Nava, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 437, p. 354, 1999.
- [7] M. Niraula, D. Mochizuki, T. Aoki, Y. Tomita, T. Nihashi, and Y. Hatanaka, "Development of high-resolution CdTe radiation detectors in a new M-pin design," IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 46, p. 1237, 1999.
- [8] A. Owens, M. Bavdaz, A. Peacock, A. Poelaert, H. Andersson, S. Nenonen, H. Sipila, L. Troger, and G. Bertuccio, "High resolution x-ray spectroscopy using GaAs arrays," J. Appl. Phys., pt. 10, Vol. 90, p. 5376, 2001
- [9] Giuseppe Bertuccio and Roberto Casiraghi, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, Vol. 50, No. 1, p. 175, 2003.

## 저|자|약|력



성명 : 하 장 호

## ◆ 학 력

- 1988년 서울대 천문학과 이학사
- 1991년 서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 1998년 서울대 대학원 물리학과 이학박사

## ◆ 경 력

- 2001년 - 현 재

한국원자력연구소 미래원자력기술  
개발단 선임연구원

