

# 세라믹스와 반도체를 이용한 방사선 센서

글 \_ 오영제, 주관식\* || 한국과학기술연구원 재료연구부, \*명지대학교 물리학과  
Youngjei@kist.re.kr

## 1. 서론

방사선 센서는 1896년 베크렐에 의해서 방사능이 발견된 이래 방사선의 측정도구로 계속 발전되어 산업체, 연구소, 의료기관 그리고 학계 등에서 방사선, 방사성 동위원소 또는 방사선 발생장치로부터 방출되는 방사선의 계측에 널리 이용되고 있다. 현재 이용되고 있는 방사선 센서는 방사선의 종류, 에너지, 강도 등 측정하려는 목적에 따라 매우 다양하게 개발되어 있고 사용되고 있다.

많은 사람들은 방사선이란 말을 접할 때 두려워하는 경우가 많다. 그러나 방사선의 실체는 입자 또는 전자파 형태의 에너지 흐름이고 우리의 생활 공간 어디든지 존재하고 있다. 예를 들면 방사선 물질은 우리가 마시는 물, 음식물, 건축자재 그리고 인체 내부에도 존재한다. 방사선은 물질을 통과하면서 물질과의 상호작용에 의해 전리현상을 일으키는 전리방사선을 의미하는데, 이는 직접전리 방사선과 간접전리 방사선으로 구분된다. 직접전리 방사선에는 물질을 통과하면서 물질을 직접적으로 전리하는  $\alpha$ 선,  $\beta$ 선, 양자선 등과 같은 방사선이 있고, 간접전리 방사선에는 전하를 갖고 있지 않아 직접적인 전리능력은 없고 물질과 상호 작용한 결과로 발생하는 하전 입자에 의해 전리능력이 부여되는 X선,  $\gamma$ 선 등과 같은 방사선이 있다.

따라서 이와 같은 방사선을 측정하기 위해서 방사선과 물질과의 상호작용을 통하여 발생하는 전리나 발광현상에서 발생하는 전하나 빛을 측정하는 방식으로 방사선

센서를 이용한다. 방사선 센서는 방사선을 전하나 빛과 같은 측정 가능한 물리량으로 변환하여 측정하는 일종의 방사선 검출기이다. 전하나 빛은 방사선 센서를 통하여 전기신호로 바뀌게 되며 이를 계수기에 의해 방사선량을 측정하거나 신호의 크기에 따라 방사선의 에너지 정보를 얻게 된다.

본 고에서는 방사선을 검출하는 기본원리를 중심으로 현재 상용화된 세라믹 섬광센서 및 반도체 방사선센서 각각의 특성에 관하여 기술코자 한다.

## 2. 섬광(Scintillation) 센서

광학적으로 투명한 어떤 종류의 결정에 하전입자가 입사하면 여기후의 완화 현상의 일환으로 적당한 파장의 광이 방출되는 경우가 있다. 이 광을 광전자 증배관에서 받아 전기신호로 변환하면 방사선 검출기로서 작용하는데 이것을 섬광 센서라고 한다. 이것은 핵물리에서 관심이 많은 방사선이  $\gamma$ 선검출에 대하여 적당한 흡수 확률을 주는 더 높은 밀도를 가진다. 처음에 입사 방사선이 센서로 들어가서 많은수의 상호작용을 거치며 그 결과 원자를 여기상태로 올린다. 그 결과 여기된 전자가 다시 낮은 상태로 천이 되면서 가시광선을 방출한다. 이 빛은 광전자 증배관의 광전면을 통과하면서 광전자를 방출한다. 이 광전자는 2차전자 증배관을 통과하면서 증배되고, 가속되어 출력펄스로 형성된다. 많은 종류의 섬광체와 PMT가 사용되는 목적에 맞게 적절히 선택되어 이용가

능하다. 물질 선택에 있어서 보통 고려하는 특성은 광출력(입사에너지가 광으로 나타나는 효율), 방사선이 흡수되는 확률, 타이밍(timing) 그리고 에너지 분해능을 포함한다.

### 2.1. 섬광센서의 구조

Fig. 1은 다양한 섬광센서의 사진을 보여주고 있다. 섬광센서는 방사선의 에너지를 광으로 변환하는 섬광체와 빛을 전기적인 신호로 변화하는 광전자 증배관(photo-multiplier tube; PMT) 또는 광다이오드(photodiode; PD)로 구성된다.

섬광체와 광센서사이에는 빛의 반사에 의한 손실을 줄이기 위해 실리콘 오일 등으로 직접 밀착하거나 경우에 따라서는 석영유리, 아크릴수지 등으로 제작한 광도파관을 넣어 수광하기도 한다. 방사선이 섬광체내에 입사하여 에너지를 잃게 되면 대부분 이 에너지에 비례하는 양의 빛을 방출하며, 방출된 빛은 광전자 증배관의 광전면에서 섬광량에 비례하는 수의 전자로 변환되어 광전자 증배관 내의 다이노드에 의해  $10^5$ - $10^6$ 배 증배되고 방사선이 잃은 에너지에 비례하는 출력 신호를 얻게되며, 출력 신호를 증폭·정형한 후 파고치를 분석하면 입사 방사선 에너지에 대한 정보를 얻을 수 있다.

섬광 센서는  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 선 등의 감지 및 스펙트럼 측정 등에 활용되고 있으며, 또한 섬광체의 종류가 많고, 크기와 형태를 다양하게 제작할 수 있기 때문에 방사선의 종류, 에너지 등 목적에 적합하게 사용 가능한 것이 큰 장점이다.

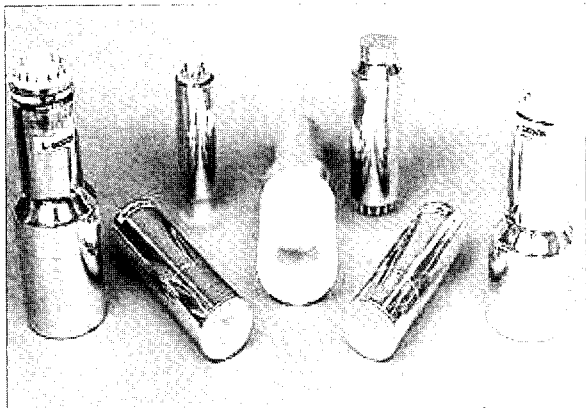


Fig. 1. 섬광 센서.

### 2.2. 섬광체의 종류 및 특성

섬광체는 무기(주로 무기결정)와 유기(결정, 액체 및 플라스틱) 소자가 있다.  $\gamma$ 선 에너지측정에는 광전효과와 확률이 큰, 높은 원자번호인 NaI(Tl), BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), CsI 등의 세라믹 섬광체가 주로 사용되고 있다. 한편  $\beta$ 선 에너지 측정에는 산란이 적은 저원자번호의 유기결정 및 플라스틱 섬광체가 많이 사용되고 있다.

특히 입사 방사선이  $\gamma$ 선인 경우 섬광체 내에서 콤프턴 효과, 광전효과, 쌍생성 등의 상호작용 중 대부분 광전효과에 의해 입사  $\gamma$ 선의 에너지에 비례하는 광출력을 얻기 때문에 원자번호가 큰 NaI(Tl) 등이 많이 사용되며,  $\beta$ 선용 섬광체로는 오히려 원자번호가 낮은 것이 유리하다. 이는 원자번호가 높으면  $\beta$ 선의 후방산란이 커지게 되고 입사한  $\beta$ 입자가 전체 에너지를 잃기 전에 섬광체 밖으로

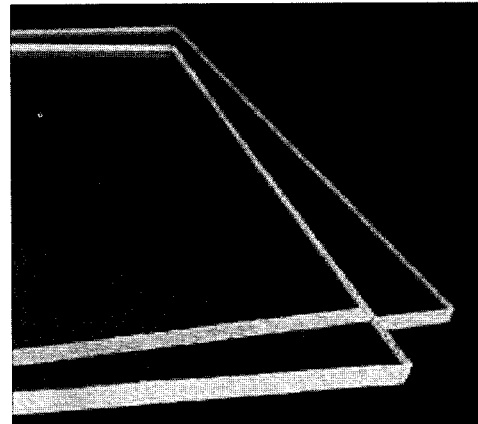


Fig. 2. 플라스틱 섬광체.

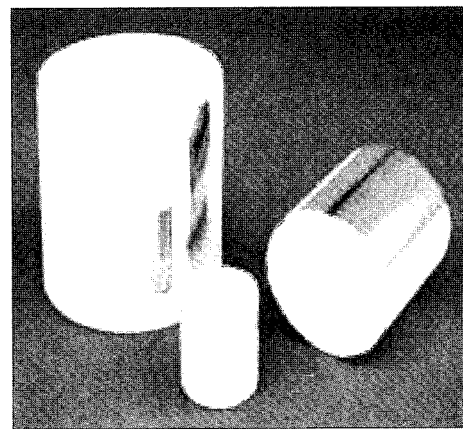


Fig. 3. NaI(Tl) 섬광체.

Table 1. 유기 섬광체의 성질

Material	Form	$\lambda_{max}(nm)$	$\tau(ns)$	$\rho (gm/cc)$	Photons per MeV
Anthracene	Crystal	447	30	1.25	16,000
PilotU	Plastic	391	1.4	1.03	10,000
NE104	Plastic	406	1.8	1.03	10,000
NE224	Liquid	425	2.6	1.51	12,000

도망갈 확률이 커지게 된다. 따라서  $\beta$ 선 측정에는 안트라센이나 스틸벤 등의 유기결정이나 플라스틱 내에 섬광 물질을 용해한 플라스틱 섬광체 등이 주로 사용된다. 또한 중성자는 섬광체 내에서 양성자의 되튐이나 중성자의 포획반응 등의 과정을 거쳐서 검출된다.

섬광체의 작동을 이해하기 위하여, 우리는 전자를 여기상태로 올리는데 에너지가 흡수될 수 있는 구조를 고려해야 된다. 두가지 기초적인 형태의 센서가 있는데, 하나는 유기물질로 구성된 것이며, 다른 하나는 무기 물질로 구성된다.

우선, 유기섬광체(액체나 고체)는 분자 사이의 상호작용이 비교적 약하며, 우리는 그것들의 특성을 분자의 이산적인(discrete) 여기상태로 논할 수 있다. 분자가 에너지를 흡수할 수 있는 두가지 방법이 있는데, 하나는 전자들은 더 높은 여기상태로 여기될 수 있으며, 분자 내의 원자들이 서로에 대하여 진동할 수 있다.

진동에너지를 전형적인 간격은 약  $0.1eV$ 이며, 전자적 여기 에너지는 몇  $eV$ 의 차수를 가진다. 보통 상황 하에서, 상온에서 섬광체의 모든 분자들은 전자적 기저상태의 가장 낮은 진동 상태에 있다. 상온에서 열에너지  $kT$ 는  $0.025eV$ 이며, 따라서, 볼츠만 상태밀도 분포(Boltzmann population distribution)  $e^{-E/kT}$ 에 따르면 전자 기저 상태 이상에서 진동 상태의 상태분포를 발견할 가망이 없다.

따라서 많은 방출된 광자 전이 중 단지 하나만이 흡수될 확률을 가진다. 이것이 섬광체의 중요한 특성을 나타낸다. 그것은 그것자신의 방식에 대하여 투명하여야 한다.

유기섬광체는 Table 1과 같이 여러 가지 형태와 종류가 있으며, 용도에 따라서 만들어지고 있다. 중성자의 검출에서는 유기 섬광체에 포함된 수소와 고속중성자의 상호작용 결과 생기는 되튐 양성자(recoil proton)가 섬광체를 섬광시키고 있다. 안트라센과 스틸벤은 무기섬광체에 비하면 밀도가 매우 작다. 따라서  $\gamma$ 선의 에너지 측정에는 적합하지 못하다. 그러므로 유효 원자번호가 작기 때문에 전자의 산란은 적고 플라스틱 섬광체와 함께  $\beta$ 선의 에너지 측정에 사용된다. 유기 섬광체의 특징은 형광의 감쇄시간이 짧다는 것이다. 이러한 이유로 빠른 시간 정보가 필요한 경우 (예를 들면, 비행시간법에 의한 에너지 측정)의 섬광체로써 유기섬광체가 사용된다.

다음, 무기섬광체는 할로겐화 알칼리류의 단결정으로 구성되어있는 것이 가장 일반적인 구조이다. NaI가 가장 흔히 사용되고있고, 단결정은 투명체를 얻을 필요가 있다. 결정면에서 반사와 흡수는 다결정(polycrystalline) 섬광체를 무용하게 만든다. 결정내에서의 공동의 상호작용으로 양자에너지 준위는 일련의 에너지 띠를 이룬다.

광자 방출의 확률을 증가시키고, 빛의 자체 흡수(self-absorption)를 줄이기 위하여 활성제(activator)라 불리우는 불순물을 약간 결정에 첨가시킨다. 흔히 사용되는 활성제로는 탈륨(Thallium)이며, 따라서 이들 센서를 예를 들어 NaI(Tl)으로 나타낸다. 활성제는 에너지 간격 내에 상태(state)를 제공한다. 활성제 상태 사이에서 광방출이 일어난다. NaI의 경우에 최대 방출 파장은 순수한 NaI의 경우의  $303 nm$ 로부터 NaI(Tl)의 경우  $410 nm$ 로 이동한다.

Table 2. 세라믹 섬광체의 성질

Material	Density(g/cm <sup>3</sup> )	Hygro-scopicity	Refractive Index	Decay Constant(ns)	Peak Scintillation Wavelength(nm)	$\gamma$ -scintillation Efficiency Relative to NaI(Tl)
NaI(Tl)	3.67	Yes	1.85	230	410	100%
CsI(Tl)	4.51	slightly	1.80	1000	565	45
CsI(Na)	4.51	slightly	1.84	630	420	85
<sup>9</sup> LiI(Eu)	3.49	No	1.96	1400	470	35
CaF <sub>2</sub> (Eu)	3.19	No	1.44	900	435	50
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	No	2.15	300	480	8
BaF <sub>2</sub>	4.89	No	1.56	0.8	225	20

NaI(Tl)에서는 활성제 기저상태가 없으므로, 이 에너지에서 흡수가 일어날 수 없으며, 파장이 자외선에서 가시광선으로 바뀌면 대부분의 광전자 증배관의 최대 감도와 더욱 잘 중첩된다.

Table 2는 몇몇 사용되는 세라믹 섬광체의 성질을 보여준다. 섬광체의 실질적 선택은 수행되는 실험의 형태에 의존한다. 예를 들어서  $\gamma$ 선에 대해 고효율이 관련되는 곳에서는 NaI(Tl)이 보통 선택되는데, 이는 I의 원자번호가 커서 광흡수에 대한 확률이 높기 때문이다. 그러나, 더 정밀한 시간 조절을 위하여, NaI(Tl)은 아주 좋지 않으며 비교적 효율이 더 낮은 플라스틱 섬광체나 유기 섬광체를 선택하는 것이 더 좋다.

섬광체를 광전자증배관에 연결시키는 것은 다양한 방법으로 수행될 수 있다. 몇몇 섬광체와 광전자증배관의 에셈블리는 밀봉된 단위(sealed unit)로 판매된다. NaI(Tl) 섬광센서는 굴절률(index of reflection)이 비교적 균일하게 변하고 내부반사(inertial reflection)가 최소가 되도록 투명한 “광학적 윤활유”(optical grease)를 사용하여 PMT의 유리에 직접 접촉시킬 수 있다. 때때로 광전자 증배관 모양은 섬광체 모양과 아주 다르거나, 광전자 증배관이 섬광체로부터 멀리 떨어져 있어야 한다. (예를 자기장의 효과를 제거하기 위하여) 이 경우에 도광관(light pipe or light shield)이 사용된다. 도광관은 어떠한 크기로도 잘릴 수 있으며, 또는 투명합성수지(Lucite)와 같은 보통의 투명한 물질의 모양을 취할 수도 있다. 섬광체와 도광관은 모두 빛의 집속 효율을 개선시키기 위하여 반사 물질로 포장되어야 한다.

### 2.3. 광전자 증배관

Fig. 4에서 보는 바와 같이 광전자 증배관은 광전관의 일종으로 광을 전류로 변환하는 광음극(photo-cathode)과 미약한 전류를 증폭하는 2차 전자증배관으로 구성되어 있다. 섬광형 방사선 센서는 S/N비가 좋은 광전자 증배관의 출현에 의해 실용화되었다.

광전자 증배관의 음극재료는 많은 종류가 있지만 섬광형 방사선 센서에는 섬광체의 섬광스펙트럼에 잘 일치하는 분광감도를 지닌 S-11이 주로 사용되고 있다. 즉, S-

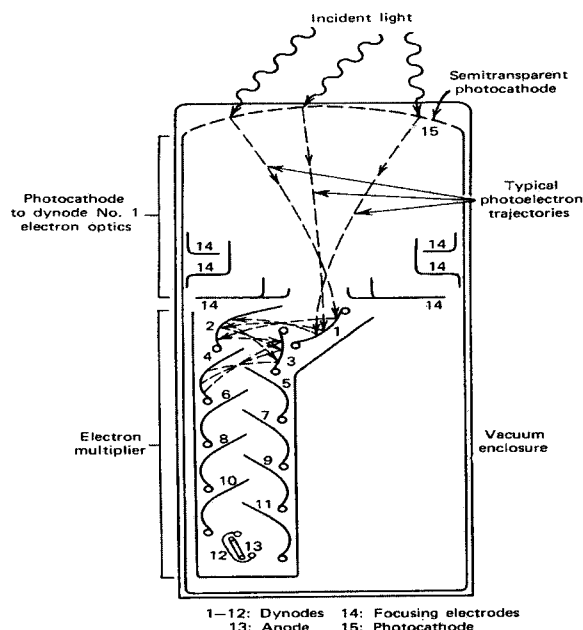


Fig. 4. 광전자 증배관의 구조

11은 파장이 600 nm로부터 350 nm사이의 감도를 가지고 있으며, 400 nm부근에서 최고 감도를 가지고 있다.

광전관의 용기재질로 유리를 사용한 경우에는 파장 350 nm는 유리의 광흡수에 의한 한계이며, 석영유리를 사용하면 약간 더 짧은 파장까지 감도를 지니게 된다. 또한 음극의 재료는 S-11의 분광감도와 대응하고, 암전류(dark current)가 적은  $K_2CsSb$ 과 같은 bialkali의 반투명한 증착막이 이용되고 있다. 다이오드에는  $MgO$ ,  $Cs_3Sb$ 가 이용되고, 전류 증배율은 10이하이다.

최근에는 Zn을 도핑한 GaP와 같은 음전자 친화력이 좋은 재료가 개발되어 전류 증배율은 입사전자의 에너지에 비례하는 범위에서 최고 50배의 증배율을 지니고 있는 것도 있다.

이와 같은 다이오드를 이용하게 되면 단수를 작게 할 수 있으므로 2차 전자증배관에 있어서 신호의 시간에 대한 요동을 작게 할 수 있다. 광전자증배관에서는 비교적 저에너지의 전자가 긴 경로를 통해서 양극에 도달하기 때문에 약간의 외부 자기장에 의해서도 영향을 받기 쉽다. 따라서 투자율이 높은 재료로 광전자증배관을 자기 차폐해야 하며, 광전자증배관 사용시 문제가 되는 것이 잡음이다. 특히 저에너지 방사선을 측정할 경우에 더욱

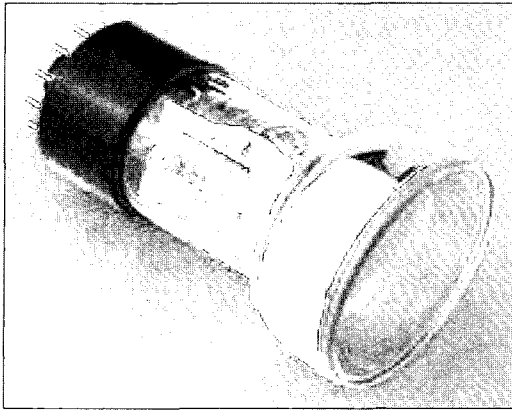


Fig. 5. 광전자 증배관.

더 문제가 되는데 잡음의 원인으로는 절연물을 통한 누설전류, 음극, 맨 앞단 다이오드로부터 열전자방출, 잔류기체의 이온화 등이 있다. 각 다이오드 단계의 증대가 전압차에 의존하므로 고전압의 어떠한 변화도 출력펄스의 변화를 야기한다. 따라서 가끔 고전압원을 안정화시키는 것이 필요하다.

광범위하게 다양한 광전자증배관이 이용 가능하다. 물리적 크기, 다른 입사 파장에 대한 광음극의 감응, 광음극의 감도, 증대, 잡음준위 그리고 시간조절 특성 등과 같은 경우들에 의하여 선택된다. 최근에 광전자증배관 이외에 광전자변화 소자로서 잡음이 적은 광다이오드가 개발되었다. 광전자증배관과 비교해서 광다이오드는 소형, 저전압, 외부 자기장의 영향을 받지 않는 등 장점을 가지고 있다. 잡음 준위, 신호의 상승시간, 분광감도가 좋은 PIN 실리콘 광다이오드, 실리콘 avalanche 광다이오드 등이 섬광센서의 수광소자로서 이용되고 있다. 현재 시판되고 있는 광다이오드는 섬광체의 섬광 스펙트럼인 근자외선 영역에서 감도가 작고, 유감면적이 작은 것 등 개선의 여지가 많이 있다. PIN 광다이오드는 단순히 수광소자로 사용되는 이외에  $\alpha$ 선의 에너지 측정에도 사용되고 있다.

### 3. 반도체 방사선센서

반도체 방사선센서는 Bell 연구소의 Mckay가 p-n 접합형의 Ge 다이오드에 역전압을 걸고  $\alpha$ -입자를 입사시켰을 때 전자-양공 쌍이 생성됨을 발견한 것을 시초로 하

여 방사선의 검출에 획기적인 변화를 가져다주었다.

반도체 센서는 근본적으로 전리함과 같은 작동원리를 갖는 고체상태의 장치이다. 그러나 반도체에서의 전하 운반체는 기체 계수기와 같은 전자와 이온이 아니라 전자와 “정공(hole)”이다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 반도체 센서는 실리콘(Si)과 게르마늄(Ge) 단결정으로 만든 것이고, 최근에는 전자기술의 개발에 따라 결정의 제작기술도 발달되어 GaAs, CdTe, SiC와 HgI<sub>2</sub> 등 각각 특징이 있는 센서들이 나오고 있다.

현재의 X선용 반도체 센서는 예외 없이 실리콘 또는 게르마늄의 p-n 접합을 역바이어스했을 때에 생기는 공핍층(depletion layer)을 이용하고 있다. 따라서 공핍층이 만들어지는 방법에 의해 반도체 방사선센서는 다음 3가지로 분류할 수 있다.

- (1) p-n 접합형 (p-n junction type)
- (2) 표면장벽형 (surface barrier junction type)
- (3) 리튬 유동형 (Lithium drift type)

여기에서 p-n 접합형과 표면장벽형을 묶어서 확산접합형이라고 분류하기도 한다. 이것들은 각각 장단점이 있고 측정하고자 하는 방사선의 종류에 따라 사용이 구분된다. p-n 접합형은 p형반도체 위에 인(P) 등의 donor를 얇게 확산시킨 것이고, 표면장벽형은 n형 반도체의 표면에 얇은 금 등의 금속을 증착 하여 반도체접합을 만든 것이다. 어느 것이나 다이오드 특성을 나타내고 역전압을 인가 할 경우 공핍층이 형성된다.

Table 3에 방사선 반도체 센서의 특징을 나타내었다.

Table 3. 반도체 방사선센서의 특징

형	구조	공핍층의 두께(nm)	비 고
확산 접합형	n <sup>+</sup> -p	<5	
표면 장벽형	p <sup>+</sup> -n	<5	Si. 제조가 용이(n형 실리콘의 표면을 산화). 열처리를 함으로써 고에너지 분해능, 표면 불감층이 얇음(0.1 $\mu$ m)
리튬 유동형	n <sup>+</sup> -i-p	<15-20	Si(Li). 항상 냉각이 필요. 고에너지 분해능. 300keV 이하의 X선에 최적. Ge(Li). 항상 냉각 필요.
고순도 게르마늄형	p <sup>+</sup> -p-n <sup>+</sup>		HpGe. 사용할 때 냉각. 대체적(-200 cm <sup>3</sup> )의 것이 얻어진다. 고에너지 X, $\gamma$ 선에 최적이며 헨디 타입이다.

### 3.1. P-N 접합형 방사선센서

일반적으로 p-n 접합형은 p형 반도체 위에 인(P) 등의 donor를 얇게 확산시킨것이다. 즉, P형 반도체의 한쪽에 n형 불순물(주로 인)의 증기를 쬐으로써 표면 근처의 결정을 n형 물질로 전환시켜 제작한다. 따라서 표면으로부터 어떤 거리에 n형과 P형 불순물의 상대농도가 역전되는 접합이 형성되게 되는데, 보통 확산된 형성층의 두께는 0.1~ 0.2  $\mu\text{m}$  정도이다.

P형 결정의 표면에 n형 층을 형성하기 위해서는 원래의 P형 불순물에 비해 더욱 강하게 n형 불순물을 확산시켜야 하므로 공핍층은 접합부위에서 P형 측으로 확장된다. 따라서 n형 표면층의 대부분은 공핍층에 속하지 않게 되어 입사방사선이 감응역영인 공핍층에 도달하는 것을 방해하는 불감층(dead layer), 또는 창역할을 하게 된다. 다시 말해 표면의 n형층 때문에 입사 방사선이 가진 에너지 중 일부가 손실되어 방사선 분광을 방해한다.

### 3.2. 표면장벽형 방사선센서

Fig. 6에서 보는 바와 같이 표면장벽형은 n형 반도체의 표면에 얇은 금 등의 금속을 증착하여 반도체접합을 만든 것이다. 이 센서는 p-n 확산접합형 센서에서 발생하는 불감층의 문제를 해결하기 위하여 고안된 센서형식으로, 보통 n형 반도체의 한쪽 표면에 p형 역할을 하는 고 밀도의 전자 덩어리를 만들어 준다. 그러면 형성된 접합 영역은 확산형의 경우와 유사하게 n형쪽으로 확장된 결핍영역을 나타내나 표면만이 p형 역할을 하기 때문에 불감층의 문제는 발생하지 않는다.

표면처리 방법으로는 표면을 에칭시킨후 피막이나 알루미늄을 전기접촉으로 증착시켜 표면 장벽을 만드는 방법이 가장 널리 이용되고 있는데, 이때 표면을 약간 산화시

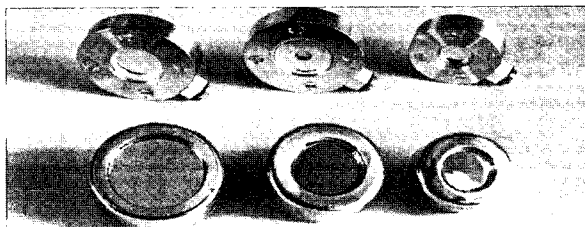


Fig. 6. 표면장벽형 방사선센서.

키는 조건하에서 증착시키면 가장 좋은 효과가 얻어진다.

표면장벽형 센서는 불감층이 극히 얇다는 장점을 갖고 있기는 하지만 이때문에 입사창이 거의 투명하게 되어 빛에 매우 민감한 반응을 나타낼 뿐만 아니라 손상되기 쉬운 단점을 가지고 있다. 따라서 특별한 진공 용기 등을 사용하여 빛에 의한 잡음을 최소화시켜야 하고, 또 취급 시 표면이 오염되거나 직접 손에 접촉되지 않도록 특별히 주의해야 한다.

### 3.3. 리튬 유동형 방사선센서

반도체 센서를 이용하여  $\gamma$ 선을 측정하고자 할때는 상당히 큰 공핍층을 필요로 한다. 이러한 이유로 고안된 것이 pin형 센서이다. p층과 n층 사이에 진성반도체층(1층)을 갖는 pin 구조를 만들고 역바이어스전압을 걸면 1층 전역이 공핍층으로 작용하고 대단히 유효체적이 큰 반도체 센서를 만들 수 있다. 이와 같은 진성 반도체층을 실현하는 방법으로서 Li보상법이 사용된다. 이것은 p형 반도체의 표면에 Li을 열확산 시키고 역전압을 가해서 과잉의 Li을 p형 영역에 유동시켜 p형 영역의 acceptor를 보상하고 겔보기상의 1층을 만드는 것을 Si 혹은 Ge중에 Li 이온이 대단히 높은 이동도를 갖고 있는점을 이용한 Si(Li)와 Ge(Li) 형태의 센서가 있다(Fig. 7).

센서의 형태는 평면형과 동축형으로 구별할 수 있다.

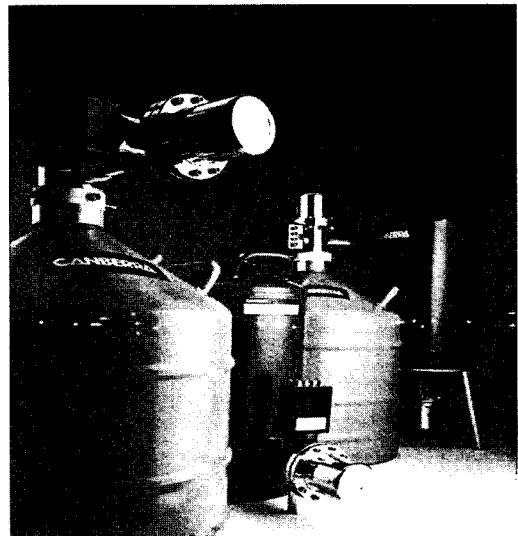


Fig. 7. 리튬 유동형 센서.

평면형의 경우에는 X선이나 고에너지  $\beta$ 선의 측정에 사용되고, 동축형은 유효체적이 크기 때문에 ( $<200 \text{ cm}^3$ )  $\gamma$ 선 측정에 좋다. 앞에서 기술한 바와 같이  $\gamma$ 선측정에 원자번호가 높은 물질이 적당하기 때문에  $\text{Ge}(Z = 32)$ 이 사용된다. 한편 Li를 유동한 것을 상온에 방치한 경우에는 Li가 이동하여 특성을 해치기 때문에 사용할때나 보존시에 액체질소(77. K)에서 냉각시켜 놓지 않으면 안된다. 이 때문에 센서를 진공의 용기에 넣고 이것을 액체질소가 든 병에 장치한다.

### 3.4. 고순도 게르마늄 방사선센서

고순도 게르마늄( $\text{Hp}(\text{Ge})$ ) 방사선센서의 소재는 알루미늄 등의 잔류 불순물 때문에 p형이다. n+층에는 리튬이 고농도로 확산되어 있다. 이 두 층의 접합을 역바이어스 하면 고저항의 p층 내에 공핍층이 n+층으로부터 발달한다. 공핍층이 입사층의 p+층까지 달해 p층 전역이 공핍화 되는 바이어스 전압을 공핍화 전압(depletion voltage)  $V_d$ 라 한다.  $\text{Hp}(\text{Ge})$  평면형 센서도 평면형  $\text{Ge}(\text{Li})$  계측기와 마찬가지로 시간 응답특성은 빠르나 검출효율이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 동축형  $\text{HpGe}$  검출기의 경우에도 큰 감응용적을 얻기 위하여 동축형으로 제작할 수 있으며, 우물형으로 제작이 가능하기 때문에 검출효율을 크게 향상시킬 수 있다.

베릴륨(Be) 창은 측정 에너지 범위에 따라 여러 가지의 두께가 있다. 센서 결정과 전치증폭 FET는 구리로 된 냉각봉을 이용하여 액체 질소로 냉각된다. 저온장치는 알루미늄으로 만들어져 내부는 진공 배기되고 있다. 실리콘 중의 리튬 확산 계수는 게르마늄 보다 낮음으로  $\text{Si}(\text{Li})$  센서는 상온으로 보존되며 전리능이 높은 방사선을 검출할 수 있다. 한편  $\text{Ge}(\text{Li})$  센서는 사용하지 않는 동안에도 계속적으로 저온을 유지해하는 반면에  $\text{HpGe}$  센서는 사용할 때만 냉각시키면 되므로 조작이 아주 편리한 점을 지니고 있다. 그러나 검출 효율이나 에너지 분해능 등 중요한 성능 특성은 같은 크기의  $\text{Ge}(\text{Li})$ 와  $\text{HpGe}$ 가 거의 일치한다. 상온과 액체 질소 온도와의 사이를 반복해도 특성이 변화하지 않는 센서가 시판되고 있다.

### 3.5. 화합물 반도체 센서

Li 유동센서의 주요결점은 계속적인 냉각을 요구하는 것이다. 또  $\text{HpGe}$  센서의 경우에 작동하는 동안에 냉각이 요구되는 불편함이 있다. 냉각을 위해서는 저온장치(cryostat)가 필요하며, 이 때문에 검출계통의 점유공간이 커지고, 냉각제인 액체질소의 비용이 큰 어려움이 따른다. 이러한 결점을 극복하기 위해서 상온에서도 작동할 수 있는 반도체 방사선센서를 개발했다(예,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{HgI}_2$ ).  $\text{CdTe}$  및  $\text{HgI}_2$  센서는  $\text{Si}(\text{Li})$  또는  $\text{Ge}(\text{Li})$  센서에 비해서 크기가 작다(두께 0.7 mm, 넓이  $100 \text{ mm}^2$ ).  $\text{CdTe}$  및  $\text{HgI}_2$  는 소형센서 체적이 요구되는 경우에 특히 적당하다.(우주선내의 방사선 감시, 핵발전소의 방사능측정, 의학적 휴대용장치). 센서의 체적은 작지만 구성원소의 원자번호가 높기 때문에 효율은 상당히 크다. 전자-정공 쌍을 만드는데 필요한 에너지는  $\text{CdTe}$  및  $\text{HgI}_2$ 의 경우가  $\text{Si}$  및  $\text{Ge}$ 의 경우 보다 크다. 따라서  $\text{CdTe}$  및  $\text{HgI}_2$ 의 에너지 분해능은  $\text{Si}$ 와  $\text{Ge}$ 보다 떨어진다.

그밖에 상온에서 작동할 수 있는 반도체 센서로서 다이아몬드 센서, 금속-절연체-반도체다이오드(MIS: metal-insulator-semiconductor),  $\text{GaAs}$  등이 등장하고 있다. 다이아몬드 센서는 전자-정공 쌍을 만드는데 요하는 평균 에너지가 비교적 크기 때문에( $\sim 13\text{eV}$ ), 센서의 분해능은 떨어진다. 그러나 이것은 유해한 화학적 환경의 고온에서 하전입자를 검출하는데 유망하다. MIS 다이오드는, 금속, 절연체 및 반도체의 3층으로 구성되어 있다. 그 중

Table 4. 화합물 반도체 방사선센서의 특징

재료	ZMAX	Eg(eV) 상온	$\mu(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$		운반체 수명	결정구조
			전자	정공		
ZnSe	32	2.70	550	40	1	ZB
ZnTe	52	2.25	340	110	45	ZB
HgI <sub>2</sub>	80	2.2	94	4	25	Layered
BiI <sub>3</sub>	48	1.74	650	50	10	ZB
CdSe	80	1.7	680	20	5	Layered
AlSb	51	1.62	1,200	700	1	ZB
Cs <sub>3</sub> Sb	55	1.6	500	10	40	Cubic
CdTe	52	1.50	1,050	100	6	ZB
GaAs	32	1.45	8,500	450	1	ZB
WSe <sub>2</sub>	74	1.36	100	80	1	Layered
InP	49	1.35	4,700	150	3	ZB
Si	14	1.115	1,350 3,900	480		Cubic
Ge	32	0.665		1,900		Cubic

의 하나가 금속산화 silicon-silicon 이다. 절연체의 두께 (100~250 nm)는 아주 중요한 변수로 작용한다. 절연체가 있으므로 해서 전류가 감소되고 실온에서 작동이 가능하게 된다.

GaAs도 역시 유망한 상온작동 센서이다. 전자-정공 쌍을 만드는데 요구되는 평균에너지와 에너지 간격은 CdTe의 값과 가깝다. 그러나, 구성원소들의 원자번호가 낮기 때문에 GaAs 센서의 효율은 같은 체적에 대해서 CdTe 보다 낮다. Table 4는 상온반도체 센서로서 유망한 화합물 반도체의 특성을 나타낸다.

#### 4. 결론

방사선 및 영상계측 기술에 있어서 중요한 역할을 담당하고있는 방사선 센서들이 우주과학이나 지질 탐사에

도 이용되고 있으며 방사선의 의학적 이용이 활발 해지면서 NaI(Tl)나 BGO 결정을 이용한 섬광센서는 감마카메라, X선 단층 촬영, 양전자 소멸 현상을 이용한 인체 내부촬영(PET)이나 골밀도 측정 등에 활발히 이용되고 있을 뿐만아니라 공업계측, 비파괴 검사 등에도 이용되고 있다. 방사선 및 영상계측 기술의 중요성이 한층 요구되고 있는 이 상황을 반영하는 그 일례의 하나로써 DR을 위한 X선 검출센서가 앞서 기술한 섬광체 센서이외에 반도체 방사선센서 분야에서도 의료용을 중심으로 활발히 연구 수행 중에 있다.

특히 방사선센서의 경우 기존의 아날로그방식에서 디지털방식으로 처리하는 기술의 발달로 컴퓨터 시스템을 이용하여 영상 처리능력이 종전보다 훨씬 빨라지고 정확해져가고 있으며, 흑백 영상에서 칼라의 영상으로 2차원 영상에서 3차원 영상으로 급속도로 발전해 가고 있다.

#### 오영제



- 1977년 연세대학교 세라믹공학과(학사)
- 1979년 연세대학교 세라믹공학과(석사)
- 1987년 연세대학교 세라믹공학과(박사)
- 1989년 미국 일리노이즈대학(Urbana-Champaign) 포스트닥
- 1982년-현재 KIST 재료연구부, 책임연구원
- 2000년 KIST 신산업창업보육센터장
- 2002년 Academician, International Academy of Engineering
- 2004년 일본 동경공업대학, 방문과학자
- 2005년 한국센서학회, 부회장

#### 주관식



- 1976년 연세대학교 물리학과 (학사)
- 1978년 연세대학교 물리학과 (석사)
- 1987년 연세대학교 물리학과 (박사)
- 1981년-현재 명지대학교 물리학과, 교수
- 1989년 미국 Univ. of Missouri-Columbia, 포스트닥
- 1995-1998년 미국 Lawrence Berkeley National Lab., 교환교수