

Special Thema | 방사선 센서 기술 개발

강상묵 연구원
 (한국원자력연구소 방사선계측기Lab.)
김용균 책임연구원
 (한국원자력연구소 방사선계측기Lab.)

1. 서론

센서란 온도·압력, 소리·빛 등 여러 종류의 물리량을 감지·검출하거나 판별·측정하여 신호로 전달하는 기능을 갖춘 소자(素子), 또는 이러한 소자를 이용한 계측기를 의미한다. 생물학 용어인 감각기(Sensorium)와 같은 말이며, 라틴어의 Sensus에서 만들어진 공학 용어이다.

방사선 측정 분야에서는 센서라는 용어보다는 검출기(Detector)라는 용어가 일반적으로 사용되고 있다. 1897년에 퀴리 부인이 방사선을 발견한 이후로 개발되어 온 방사선 검출기는 자연 및 인공 방사선을 측정하기 위한 센서로서 이용되어져 왔으며 최근 들어 기초과학에서는 방사선의 강도 및 에너지 등을 측정하여 핵 및 소립자의 성질을 규명하는데 사용되고 의료용으로는 감마카메라, CT, PET 등의 장비에서 X-선 및 감마선을 측정하여 진단하는데 사용되고 있다. 또한 산업용으로는 디지털 방사선 비파괴 검사, 액면 측정, 두께 및 밀도 측정, 성분 측정에도 사용되는 등 응용범위가 매우 넓은 센서 기술이다.

방사선이 물질 속으로 입사되면 원자들과의 상호작용을 일으키고 결과적으로 전자들을 만들어 낸다. 이 전자들을 수집하여 형성된 전기적 신호를 전자회로를 통하여 분석하는 것이 방사선 검출 기술이다. 방사선 검출기의 분류는 방사선이 어떤 물질과 반응하여 전자를 생성하는지에 따라서 크게 세 가지로 분류된다. 반응 물질로 기체를 사용하는 기체 방사선 검출기, 방사선과 반응하여 빛을 내는 물질을 이용하는 섬광체 검출기, 반응 물질로 반도체를 사용하는 반도체 검출기로 구분할 수 있다.

2. 기체 검출기

기체 방사선 검출기는 일반적으로 그림1과 같이 실린더 형태로 중앙 전극이 양극(+)으로 실린더 벽이 음극(-)으로 구성된다. 방사선이 검출기에 입사되면 충전가스를 전리시켜 전자와 양이온의 이온쌍을 생성한다. 이

때 검출기의 양극과 음극 사이에는 높은 전위차(HV : High Voltage)가 걸려 있으므로 전자는 양극으로 양이온은 음극으로 이동하게 된다. 전자와 양이온이 전극에 포집됨에 따라 전류가 흐르고 후위에 위치한 정밀한 전류측정장치를 통해 신호를 표시한다. 검출기에 입사되는 방사선 준위가 높을수록 검출기에는 더 많은 전류가 흐른다. 한편 전자와 양이온의 질량 차로 인해 양이온이 음극에 도달하는 시간은 전자가 양극에 도달하는 시간보다 약 1000배 이상 오랜 시간이 걸린다.

그림2는 펄스모드로 작동하는 여러 가지 유형의 기체 검출기의 특성을 나타낸다. 검출기로부터 관측된 펄스의 진폭을 인가전압 또는 검출기 내부의 전기장 세기에 대해서 표시하였다. 아주 낮은 전압에

대해서 전기장은 최초의 이온쌍의 재결합을 방지하기에는 불충분하므로 수집 전하는 최초의 이온쌍의 전하보다 적게 된다. 전압을 올리면 재결합이 억제되고 이온포화영역(Region of Ion Saturation)에 도달한다. 다시 전압을 증가시키면 가스 증배가 시작되는 문턱 전기장에 도달한다. 이 때 수집전하는 입사방사선에 의해서 생성된 최초의 이온쌍에 비례한다. 이것이 비례영역(Proportionality Region)이고, 비례계수기의 작동모드 영역이다. 인가전압 또는 전기장을 더욱더 증가시키면 비선형 효과가 일어나기 시작한다. 그리고 인가전압을 아주 높게 하면 양이온에 의해서 생긴 공간전하가 완전하게 지배적이 되어 그 후의 펄스의 거동을 결정한다. 이런 조건하에서는 양이온의 수가 증가하고 가스증배가 발생케 되는 값 이하로 전기장이 강화될 때까지 전자사태가 진행된다. 이것이 GM영역(Geiger Mueller Region)이다.

2.1 전리함(Ionization Chamber)

원리적으로 전리함은 기체 검출기 중에서 가장 간단한 구조이다. 전리함에 흐르는 전류는 기체의 증폭 없이 순수하게 초기 이온쌍의 수에 기인하며 출력신호는 방사선장의 강도에 비례한다. 초기 이온쌍의 수는 검출기에 흡수된 입사방사선의 에너지에 비례하므로 선량을 측정이 가능하고 공기로 채워진 전리함을 이용할 경우 조사선량을 측정할 수 있다. 그러나 방사선과 검출가스의 상호작용으로 생성된 초기 이온쌍만이 포집되어 출력전류를 형성함으로 전리함에는 아주 작은 양의 전류가 흐른다. 따라서 정밀한 전류측정장치가 필요하다.

2.2 비례계수기(Proportional Counter)

비례계수기는 기체 검출기의 한 유형이고 1940년대 후반에 도입되었다. 전리함이 사용되는 전압영역보다 더 높은 전위차를 검출기에 인가하면 입사방사선이 검출기 가스를 전리하여 생성된 초기전자는 양극으로 포집되는 과정에서 가속되어 2차 전리를 일으킬 수 있는 충분한 에너지를 얻게 되고 다시 2차 전자는 또 다른 전리를 야기한다. 이러한 현상을 “전자사태”라고 부르고 비례계수관의 출력은 검출기에서 생성된 총 이온쌍의 수에 비례한다. 비례계수기는 방사능 측정뿐만 아니라 출력펄스가 입사방사선

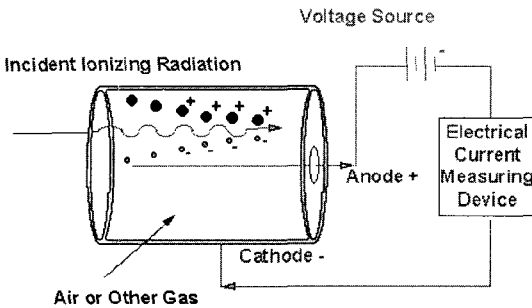


그림 1. 기체검출기의 일반적 구조 및 원리.

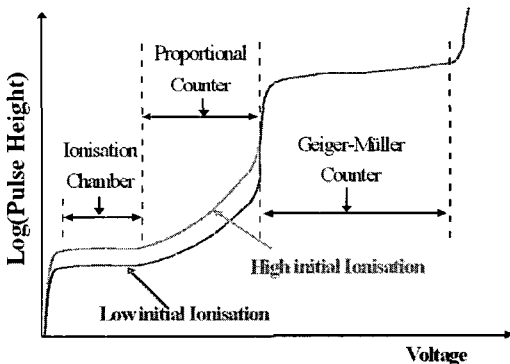


그림 2. 동작전압에 따른 기체검출기의 유형.

의 에너지에 비례하므로 방사선의 에너지 측정이 가능하며 방사선의 종류에 따른 전리밀도의 차를 이용하여 알파선과 베타선을 동시에 측정할 수 있다. 방사선이 검출기에 입사되어 전자사태가 발생하고 전자와 양이온이 전극으로 포집되어 출력펄스를 형성하는 동안에 또 다른 방사선이 입사되면 검출기는 잇따른 방사선을 이전 방사선과 구분할 수 없다. 이와 같이 방사선에 의한 출력펄스를 구분하는데 걸리는 시간을 불감시간 또는 회복시간(Dead Time or Recovery Time)이라고 부른다. 비례계수기의 불감시간은 수 nsec정도이며 계수율이 낮을 경우에는 문제되지 않지만 계수율이 높은 선원인 경우에는 이에 대한 보정이 이루어져야 한다.

비례계수기에 주로 사용되는 기체는 90%의 아르곤과 10%의 메탄으로 구성된 "P-10 가스"이며 10%의 메탄은 방사선과 검출가스와의 반응과정 동안에 여기되었던 원자에서 방출되는 자외선에 의한 부가적인 전리를 방지하기 위해 첨가되는 "소멸기체(Quench Gas)"이다. 만약 비례계수기에서 자외선에 의한 전리현상을 허용한다면 검출기의 출력펄스의 에너지 비례성이 상실된다.

2.3 GM 검출기(Geiger-Mueller Detector)

GM 검출기는 가장 오랜 형태의 방사선 검출기의 하나로서 1928년에 Geiger와 Mueller에 의해서 도입되었다. 이 검출기는 간단해서 가격이 저렴하고 조작도 쉽기 때문에 현재에도 사용되고 있다. GM관에는 일반적으로 비례계수기가 사용되는 전압영역보다 높은 전압이 인가되고 비례계수기에서는 허용하지 않았던 자외선에 의한 부가적인 전리현상을 용인하므로 방사선이 입사되면 양극을 중심으로 GM관의 모든 영역에서 전자사태가 발생한다. 따라서 GM관의 기체증배인자는 $\sim 10^8$ 에 이르므로 펄스를 증폭시키기 위한 부가적인 전자장치가 필요 없을 만큼 충분한 크기의 출력펄스를 형성한다. 그러나 GM관에서 생성되는 총 이온쌍의 수는 초기이온쌍의 수와 관계없이 동일하기 때문에 출력펄스의 크기는 입사되는 방사선의 종류와 에너지에 무관하게 동일하다. 따라서 GM검출기는 입사방사선의 종류와 에너지를 구분할 수 없고 단지 계수되는 방사선의 개수, 즉 방사능만 측정 가능하다. 이와 같이 GM검출기는 입

사방사선의 성질에 대한 정보를 상실하고 단지 그 수만을 나타내므로 원칙적으로 방사선의 에너지에 종속적인 방사선량을 측정할 수 없다. 이러한 GM검출기의 최대 약점을 보완하기 위해 검출기의 외벽을 적절한 물질(Cu, Sn, Pb 등)로 차폐하여 저에너지 영역의 광자에 대한 감응도를 낮춤으로써 100 keV에서 수 MeV까지의 영역에서 감응도를 일정하게 조정한다. 이렇게 하면 에너지와 선량과의 관계가 균일해지므로 에너지에 관계없이 입사방사선의 수만을 계수하여 근사적인 방사선량을 얻을 수 있다. 이와 같은 GM관을 "보상형 GM검출기"라 부르고 주로 선량률을 측정하는 서베이미터(Survey Meter)로 사용하고 있다. GM검출기에 주로 사용되는 기체는 He과 Ar이며 전리를 통해 생성된 양이온이 벽물질과 충돌하여 2차 전자를 방출하는 것을 방지하기 위한 소멸기체로 할로젠기체(Cl_2 , Br_2 등)나 유기기체(에틸알콜, 에틸포에이드)가 5~10% 첨가된다. 일반적으로 GM검출기의 불감시간은 100~400 msec이다.

2.4 기체형 위치검출기

기체형 위치검출기는 기체증폭을 이용하는 비례계수기와 동일한 원리를 갖는다. 하지만 비례계수기의 경우 입사방사선의 에너지에 대한 정보만을 제공하지만 위치검출기는 위치정도까지 전자적 신호로 검출할 수 있다.

기체를 사용하여 입사입자의 위치를 전자적 신호로 검출하는 최초의 검출기는 1968년에 G. Charpark이 고안한 다중선비례계수관(Multi Wire Proportional Chamber: MWPC)으로 오늘날까지 고에너지 물리학 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 MWPC는 연 X-선을 이용한 결정의 회절실험과 생물학 분야의 DNA, 생체조직 연구를 비롯하여 디지털 진단의학 분야의 영상검출기로서도 연구가 진행되고 있다. MWPC는 입사방사선에 대한 검출면적이 넓으며, 방사선 선속 변화에 대해 검출감도의 동적범위가 넓은 계수형 위치검출기로서 개발 후 20여년 동안 핵 및 입자물리 실험에 사용되었다.

다중선비례계수관은 그림3에서 보는 바와 같이 직경이 10~20 μm 인 양극선을 일정한 간격으로 나란히 배치하고 양극선의 상하에 음극평면을 둔 구조로

되어 있다. 음극과 양극에 전압을 인가하면 양극선 주위에 고전기장이 형성되어(그림4) 전자증폭이 일어난다. MWPC는 유효 검출면적을 넓게 할 수 있고 스파크 등에 강한 구조를 지니고 있어서 고에너지물리학 분야에서는 아직도 입자검출과 트래킹(Tracking) 실험을 위해 이용되고 있다. 하지만 음극과 양극사이의 긴 거리로 인해 매우 느린 양이온 신호성분을 감수해야 하고, 위치분해능이 1 mm 정도로 낮기 때문에 점차 미세전극형 검출기로 대체되고 있는 실정이다.

한편 유럽 원자핵 연구소인 CERN에서 진행 중인 Large Hadron Collider(LHC)의 Higgs Boson 소립자 검출실험 등에서는 고선속의 환경에서 보다 정확한 위치분해능 및 시간분해능을 지닌 고성능 검출기

가 요구되었다. 1987년 A. Oed 등은 MWPC의 새로운 대안으로 반도체 리소그래피(Lithography) 공정을 이용한 Micro Strip Gas Chamber(MSGC)를 제안하였다[2]. MSGC는 반도체 리소그래피 공정을 이용하여 제작된 최초의 기체 검출기로서 미세전극을 기판위에 형성함으로써 MWPC의 계수율, 위치분해능 등을 획기적으로 개선하였다. 그림5는 전형적인 MSGC의 구조로서 양전극과 음전극의 폭은 각각 10 μm , 100 μm 내외이며 전극 간격은 100 μm 정도이다. 양전극과 음전극 사이에 전압을 인가하면 미세한 양극 주위에 고전기장이 형성되어 표류영역에서 전리된 전자를 증폭하게 된다.

MSGC는 음전극과 양전극의 간격이 매우 좁기 때문에 고계수율(10^6 Hz/mm^2), 고위치분해능(40 $\mu\text{m rms}$)의 우수한 성능을 지닌 검출기로 평가되고 있다. 그러나 MSGC는 그림6에서 보는 바와 같이 고전압 인가 시에 양이온 포격(Ion Bombardment)과 전계방출(Field Emission) 등으로 발생한 스파크에 전극이 녹아버리는 치명적인 손상을 입기가 쉽다. MSGC의 스파크에 대한 구조적 취약성은 최대 기체 이득을 제한하게 되고 동작전압을 낮추게 되는 문제점을 야기한다. 또한 MSGC는 음극과 양전극이 나란히 배열되어 있어서 서로 인접한 음전극에서 전파된 양이온에 의한 신호가 다소 감쇠되어 나타난다.

한편 전자사태에서 생성된 전하들이 음극과 양극사이의 기판 표면에 쌓이게 되면 전기장이 교란되어 동작이 불안정해지고 노이즈가 증가하는 현상이 발생한다. 최근에 이러한 표면전하를 제거하기 위해 Diamond-Like Carbon(DLC) 코팅을 하거나, Pestov 유리와 같은 전도성 유리를 사용하여 기판의 표면저항을 저하시키는 연구가 수행되고 있다[2].

MSGC의 개발 이후 기체 검출기의 발전 형태는 초소형전자기술(Microelectronics)을 이용한 미세전극 구조로 바뀌었다. 그 결과로 기체 검출기 분야에서는 Microgap Gas Chamber(MGC)[3], Microdot Gas Chamber(MDOT)[4], Gas Electron Multiplier(GEM)[5] 등과 같이 기체증폭도(혹은 기체이득) 및 안정성이 향상된 다양한 종류의 고성능 검출기 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 유럽 및 미국의 대형 입자물리 연구소를 중심으로 전 세계의

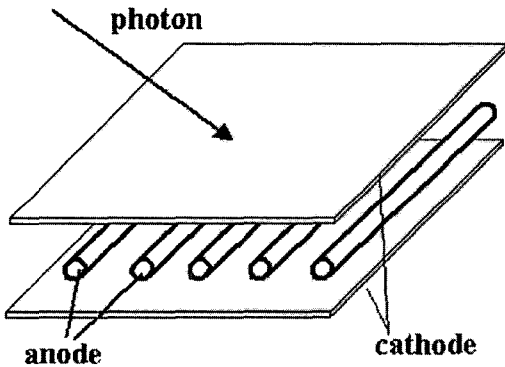


그림 3. 다중선비례계수관(MWPC)의 구조.

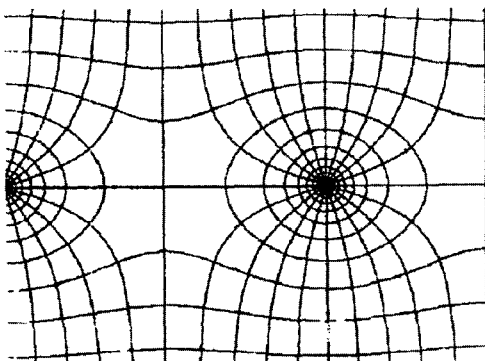


그림 4. 다중선비례계수관의 전기장 분포 모식도.

여러 그룹에서는 MSGC, MGC 등의 미세전극형 검출기의 동작에서 발생하는 표면전하 축적(Surface Charging), 노화현상 등을 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

MGC는 음전극 역할의 Si 웨이퍼 위에 양전극을 형성하고, 음전극과 양전극 사이에는 SiO₂와 같은 절연성 물질로 거리를 유지시켜 전기장이 형성된다. MGC는 MSGC에 비해 전하수집시간이 빠르며 계수율(10⁷ Hz/mm²)또한 높다. 이것은 MGC의 구조에 따른 결과이다. MGC는 MSGC에 비해 음전극과 양전극의 간격이 매우 짧기 때문에 전하 수집에 용이하며 동작 시에 강한 전기장(~수 MeV/cm)이 형성된다. MGC의 성능은 음전극과 양전극 사이의 절연성이 얼마나 좋은지와 전극 사이의 정렬 구조에

영향을 받는다. 또한 절연체로 사용되는 SiO₂의 두께에 의해 전자증폭이 큰 영향을 받는다. SiO₂ 절연체의 두께가 두꺼울수록 전자증폭이 증가하지만 MGC 제작은 2 μm 두께의 SiO₂를 사용한다. 이것은 SiO₂의 제조 공정(~0.5 μm/hr)이 어렵기 때문이다. 이러한 이유로 SiO₂를 대신할 절연체에 대한 연구도 진행 중이다.

MDOT은 MSGC, MGC와 같은 Strip 전극 구조가 아닌 픽셀형태의 방사선 검출기이고 전자증폭율도 다른 마이크로 패턴 검출기에 비해 수 배정도 크며 픽셀 구조이기 때문에 2D 구조로도 사용이 가능하다. 이러한 특성 때문에 고선량의 방사선 환경에서 사용하고자 하는 연구가 진행 중이다. 그러나 MDOT은 픽셀 개개의 신호전극이 필요하기 때문에 대면적으로 제작하기 어려운 문제점이 있다.

미세전극형 검출기에서 제기된 가장 치명적인 문제점은 검출기 자체의 고유한 특징인 미세띠(Micro

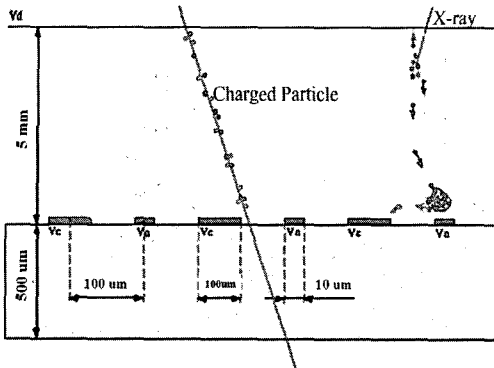


그림 5. MSGC 검출기의 단면도.

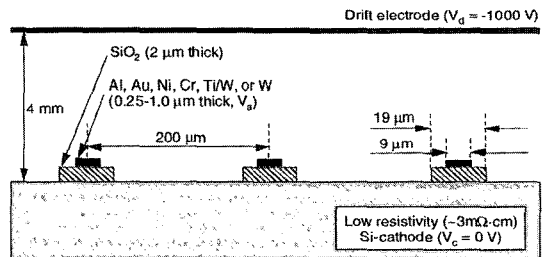


그림 7. MGC검출기의 단면도.

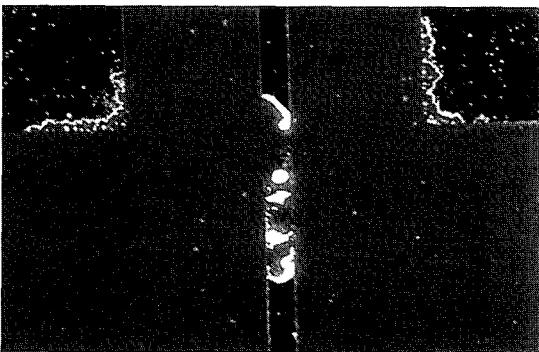


그림 6. 스파크에 의해 손상된 MSGC검출기 전극 사진.

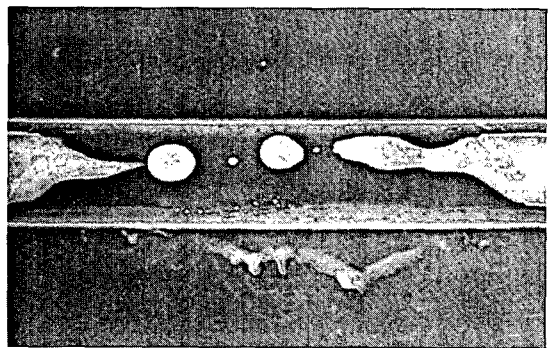


그림 8. 스파크에 의해 손상된 MGC검출기의 전극[6].

Strip) 구조에 기인한 것으로 고선속, 고이득 동작 조건에서 발생할 수 있는 스파크 의해 미세전극이 녹거나 절단되어 영구적 손상을 입게 되는 것이었다. 1996년 Fabio Sauli에 의해 개발된 GEM은 초기에 기존 기체 검출기의 표류영역(Drift Region)에 설치되어 1차 증폭기로 동작하여 MSGC 등의 미세전극 검출기에 추가적인 기체증폭도(gas Multiplication)를

제공하는 역할을 하였다. 따라서 GEM검출기의 기체이득(Gas Gain)의 기여로 미세전극 검출기에 인가되는 동작전압을 낮출 수가 있었고, 결과적으로 스파크 손상 등의 불안정한 기체 검출기의 특성을 제거할 수 있게 되었다. 점차 GEM검출기의 제작기술이 향상되고 동작 특성이 알려지면서 GEM 자체의 기체증폭도가 크게 증가되었고, 기존의 미세전극형 검출기와 같은 증폭수단을 제거하고서도 독립적 동작이 가능하게 되었다.[5]

GEM은 평판 구조로 되어 있어 스파크에 매우 강하며 계수율, 위치분해능, 노화 특성, 증폭도 등에 있어서도 현재까지 개발된 기체 검출기 보다 뛰어난 성능을 지니고 있다. 또한 B-factory, LHC의 입자물리실험에서 비적추적 검출기로 이용될 고위치분해

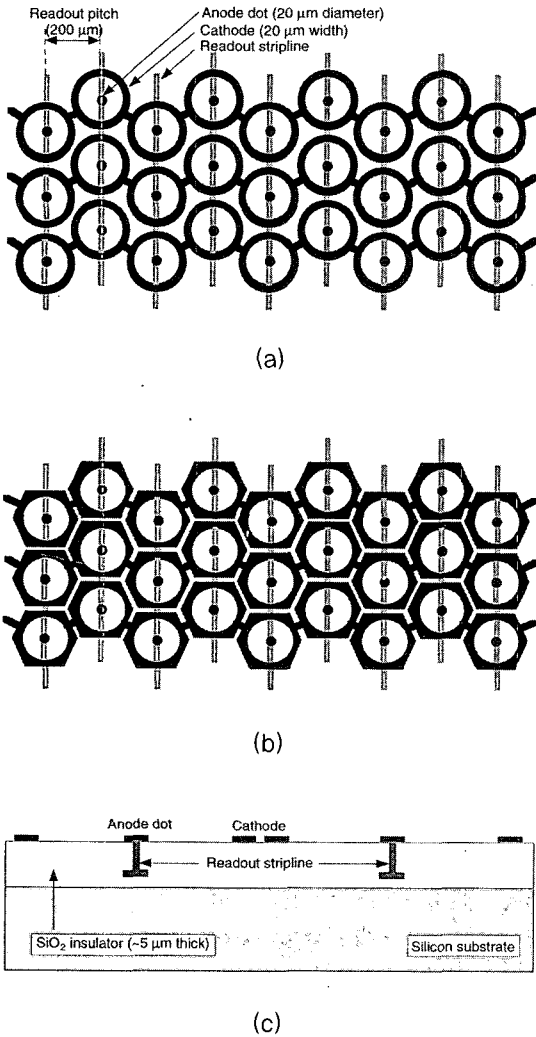


그림 9. MDOT 검출기의 구조 : (a) 원형 음전극(Cathode) 평면도 (b) 육각 음전극(Cathode) 평면도 (c) MDOT의 단면도.

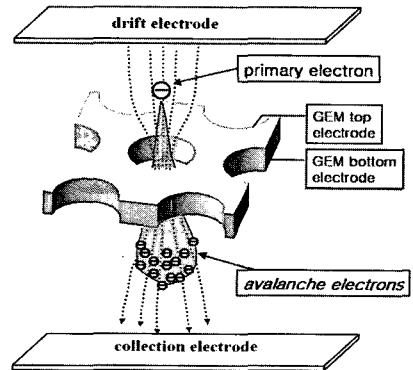


그림 10. GEM검출기의 동작원리.

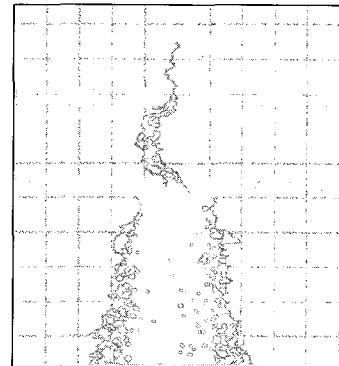


그림 11. 이중 GEM검출기의 전자증폭 모식도.

능의 Silicon Strip Detector(SSD) 검출기 등에 비해 GEM검출기는 대면적 검출기 제작이 용이하고 방사선 손상이 거의 없어 차세대 검출기로서 유력한 대안으로 평가되고 있다. 그리고 기존의 미세전극형 검출기와는 달리 전자만이 신호형성에 기여하므로 고속신호를 얻을 수 있고, 인접한 음전극에서 전파된 양이온에 의한 신호감쇠 현상을 피할 수 있다. 그러나 전체 전극간의 전기장 구성이 최적화 되지 않으면 구멍을 통과하며 전자사태(Avalanche)를 겪은 전자의 일부는 수집전극 대신 GEM의 바닥전극(Bottom Electrode)으로 끌려갈 수 있기 때문에 실제 GEM의 기체증폭도는 그만큼 감소하게 된다.

3. 섬광체 검출기

어떤 종류의 물질 중에서 발생하는 섬광(Scintillation Light)에 의해서 이온화 방사선을 검출하는 일은

예전부터 행하여 온 방사선 측정법의 하나이다. 방사선의 에너지를 흡수하였을 때 원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 여기 되었다가 다시 천이($\sim 10^{-8}$ 초 내)에)하면서 가시광선을 방출하는 물질을 섬광물질이라 한다. 입사되는 방사선장의 세기와 가시광선 방출량의 비례성을 이용하는 섬광검출기는 사용하는 섬광물질에 따라 고체, 액체, 기체 또는 유기질, 무기질의 형태가 있다. 표1은 자주 이용되는 무기섬광체의 특성을 나타낸다[7].

최근에는 원자번호와 밀도가 높아서 감마선에 대한 검출 효율이 높고 에너지 및 시간 분해능이 좋은 섬광체를 신재료로서 개발하고 있으며, Column 구조를 가진 섬광체를 이용하여 고분해능 방사선 영상 장비의 센서로 주목하는 연구가 진행되고 있다.

3.1 무기 섬광검출기(Inorganic Scintillation Detector)

무기결정은 주로 할로겐원소(I)인 무기염과 발광 중심 역할을 하는 소량의 불순물(Activator)로 구성

표 1. 무기섬광체의 특성.

Scintillator	Light yield (photons/keV)	Temperature coefficient of light output (%/C) 25°C to 50°C	1/e Decay time (ns) ($10^{-3}\mu s$)	Wavelength of maximum emission λ_m (nm)	Refractive index at λ_m	Thermal expansion (/K) $\times 10^{-6}$	Density g/cm ³	Melting point [K]
Nal(Tl)	38	-0.3	250	415	1.85	47.4	3.67	924
Polyscin ^R Nal(Tl)	38	-0.3	250	415	1.85	47.4	3.67	924
CsI(Tl)	54	0.01	1005	550	1.79	54	4.51	894
CsI(Na)	41	-0.05	630	420	1.84	54	4.51	894
CsI(pure)	2	-0.3	16	315	1.95	54	4.51	894
BGO	8 - 10	-1.02	300	480	2.15	7	7.13	1323
BaF ₂	1.8	0	0.6 - 0.8	220(195)	1.54	18.4	4.88	1627
	10	-1.1	630	310	1.50	18.4	4.88	1627
CaF ₂ (Eu)	19	-0.33	940	435	1.47	19.5	3.18	1691
CdWO ₄	12 - 15	-0.1	14000	475	-2.3	10.2	7.9	1598
ZnS(Ag)	~50	-0.6	110	450	2.36	--	4.09	2123
YAlO ₃ :Ce (YAP:Ce)	18	-0.1	27	350	1.94	-80	5.55	2148

되며 가장 대표적인 무기결정 섬광검출기는 Tl을 불순물로 첨가한 NaI(Tl) 검출기이다.[8,9]

3.1.1 NaI(Tl) 검출기

NaI(Tl) 검출기는 밀도가 3.67g/cm^3 으로 상당히 높고 원자번호가 높은 I(53)를 함유하고 있으므로 감마선에 대한 검출효율이 높다. 그러나 기계적·열적 충격에 약하고 조해성이 있으므로 알루미늄 등으로 밀폐하여 공기와 접촉을 차단한다. 밀폐로 인해 투과력이 약한 알파, 베타 또는 연질 X-선 측정에는 적절하지 않으며 통상 감마선이나 중·경질의 X-선 측정에 이용된다.

3.1.2 CsI(Tl) 검출기 및 CsI(Na) 검출기

CsI는 섬광물질로서 유용한 또 하나의 할로겐화 알칼리이고, 섬광체 중에서 단위 길이당 감마선의 흡수가 최대가 된다. 이 특성은 크기나 중량 등이 문제가 되는 우주에서의 계측장치와 같은 응용에 대해서 매우 중요하다.

CsI(Tl) 밀도가 4.51g/cm^3 으로 상당히 높고 원자번호가 높은 I(53)를 함유하고 있으므로 감마선에 대한 검출효율이 높다. 방출 스펙트럼은 NaI(Tl)의 방출 스펙트럼보다 훨씬 더 파장이 길게 정점화되는데, 이는 빛의 출력이 CsI(Tl)에서 실제적으로 더 낮을 때임이 인용된다.

CsI(Na)의 밀도는 CsI(Tl)와 같고, 단위 에너지당 광출력이 상당히 높게 NaI(Tl)의 값에 근접한다. CsI(Na)도 흡습성이 있기 때문에 공기와 접촉을 차단한다.

3.1.3 LiI(Eu) 검출기

LiI(Eu)는 ^6Li 을 농축한 것을 사용함으로써 느린 중성자 측정에 이용된다.

3.1.4 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 검출기

1970년대의 후반에 섬광물질, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 는 상업적으로 이용할 수 있게 되었고, 이 물질의 결정은 급속도로 증가되어 왔다. BGO의 중요한 장점은 고밀도(7.13g/cm^3)와 비스무스(Bi) 성분의 큰 원자번호(83)이다. 이들 성질은 감마선의 광전흡수에 관한 어느 일반적인 이용이 가능한 섬광물질의 단위 체적당 최대의 확률로 나타난다. 그러나 BGO는 광수율(Light Yield)은 비교적 낮은데, NaI(Tl)의 것보다 10~20%로 보고 되고 있다.

3.1.5 BaF₂ 검출기

다른 순수 무기물질, BaF₂가 최근에 고속 타이밍 측정에서 그 자체의 퍼텐셜 적용 때문에 주목을 끌고 있다. 현재 BaF₂는 1 nsec보다 더 짧은 감쇠시간을 갖는다. 이런 특성의 결합은 단위 체적당 높은 검출효율과 고속반응이 요구되는 섬광검출기에 사용되어진다.

3.1.6 ZnS(Ag) 검출기

ZnS(Ag)는 큰 단결정을 얻을 수 없으므로 검출용기 내에 무기분말을 얇게 발라 사용한다. 따라서 ZnS(Ag) 검출기는 알파선 측정용으로 주로 사용되고 베타 또는 감마선에는 반응하지 않는다. 밀도는 4.1g/cm^3 이다.

그 밖의 무기결정 섬광검출기로 $\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{GSO})$, $\text{YAlO}_3(\text{YAP})$, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{YAG})$, CdWO_4 등이 있다.

3.2 유기 섬광검출기(Organic Scintillation Detector)

순수 유기결정으로 섬광특성이 양호한 재료는 안트라센(Anthracene)과 스틸벤(Stilbene)을 들 수 있다. 안트라센은 가장 오래 전부터 섬광체의 목적으로 이용되어 온 유기물질이고, 다른 어떤 유기 섬광체보다 높은 섬광효율을 가지고 있다. 스틸벤은 섬광효율은 낮지만 하전입자와 전자에 의해서 생성된 섬광을 구별하는데 자주 이용되고 있다. 이들은 큰 결정을 얻기 어렵고 또 기계적 강도가 매우 약하여 결정형태로 사용되기보다 이들 섬광물질을 유기용매에 녹인 액체섬광물질 또는 중합한 플라스틱형태로 사용된다.

액체섬광물질의 특성은 임의의 크기와 임의의 형태로 검출기를 제작할 수 있다는 점과 측정 시료를 직접 섬광체와 혼합하여 사용할 수 있으므로 액체섬광검출기는 투과력이 약한 알파, 저에너지 베타선을 내는 핵종(^3H 와 ^{14}C) 계측에 매우 효과적이다. 유기 섬광물질은 원자번호가 낮은 탄화수소로 구성되고 밀도가 낮으므로 감마선 측정용으로는 사용되지 않는다.

4. 반도체 검출기

방사선을 검출 및 측정할 경우 고체의 검출매질

을 이용하는 것이 유리한 경우가 많다. 고체의 밀도가 기체의 밀도에 비해 약 1000 배 가량 크므로 고에너지 전자와 감마선을 측정하는 경우로 볼 때 고체 검출기의 크기는 이것과 같은 기체 검출기에 비해 작게 할 수 있다. 섬광체 검출기는 고체검출 매질을 마련하는 가능성을 제시해 주고 각종 방사선 계측의 응용에 대해서는 앞에서 설명되었다. 섬광체 검출기의 중요한 문제점의 하나는 에너지의 분해능이 나쁘다는 것이다. 에너지 분해능의 통계적 한계를 개선하는 유일한 방법은 펄스당 정보운반자의 수를 증가시키는 것이다. 방사선 검출기로서 반도체 물질을 사용함으로써 해서 다른 종류의 검출기보다 훨씬 많은 수의 운반자를 얻을 수 있다.

결정체 물질에서는 격자에 주기성이 있기 때문에 그 고체내의 전자에 허용되는 에너지는 띠(Band) 모양이 된다. 그림12와 같이 원자가전자대(Valence Band)와 전도대(Conduction Band) 사이의 에너지 갭(Gap)이 작아서 상온에서도 열적인 여기에 의해 원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 이동할 수 있는 물질을 반도체라고 부른다. 이와 같이 방사선의 에너지 흡수에 의해서 뿐만 아니라 상온에서도 열적 여기에 의해 반도체 검출기에는 항상 미량의 전류가 흐르기 때문에 사용 시에는 반드시 액체질소로 냉각시켜 주어야 한다.

원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 이동하면 원자가전자대에는 정공(Hole)이라 부르는 전자의 빈자리(Vacancy)가 만들어지고 이는 양전자 효과를 낸다. 반도체에서 전자·정공쌍을 만드는데 필요한

에너지는 Ge이 2.9 eV이고 Si이 3.6 eV로 기체(30 eV)에서 보다 상당히 작으므로 동일한 에너지의 입사방사선에 대하여 생성되는 정보전달자의 수가 많아서 출력펄스가 커진다. 따라서 입사방사선의 에너지를 구분하는 에너지 분해능이 우수하다. 또한 검출기가 기체보다 밀도가 1,000 배정도 큰 고체이므로 방사선의 검출효율이 우수하다.

반도체를 방사선검출기로 사용하는 기본적인 방법은 n형과 p형 반도체를 접합하는 것인데 이를 “n-p 접합형 검출기(또는 n-p 접합 다이오드)”라고 한다. n-p 접합 다이오드의 n측에 (+)로, p측에 (-)로 역바이어스 전압을 인가하면 n측의 전자와 p측의 정공이 각각 전극으로 이동하여 방사선의 검출영역인 공핍층(전자와 정공의 수가 같은 영역)이 확장된다.

흔히 사용되는 반도체는 Si 또는 Ge에 인위적으로 불순물을 첨가함으로써 반도체의 특성을 조절하는데 4족인 Si 또는 Ge에 3족 원소를 첨가한 것을 p형 반도체, 5족 원소를 첨가한 것을 n형 반도체라 부른다.

Si 다이오드 검출기는 특히 얇은 투과형 전결핍층 검출기로서 베타 입자 및 고속 전자의 측정에 이용되는 경우가 많다. 경합하는 대부분의 기술에 비해 반도체 검출기의 사용은 여러 면에서 유리한 경우가 많다. 즉 에너지 분해능 및 안전성이 좋고 시간적으로 변동하지 않으며 타이밍 특성이 뛰어나고 또 입사량이 극히 얇아서 사용하기에 간단한 것 등이다. 비교적 작은 경우에는 유리한 점이 많지만 표면적이 큰 것이 요구되는 실험에서는 단점이 된다. 표면적이

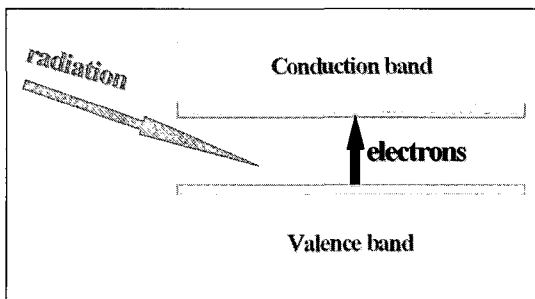


그림 12. 반도체 검출기의 구조 및 검출 원리.

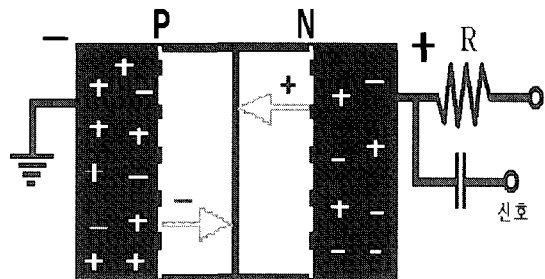


그림 13. n-p 접합형 반도체 검출기의 구조.

20 cm² 까지 Si 다이오드 검출기가 시판되고 있지만 이것은 큰 전기용량을 갖고 있으므로 작은 모양의 검출기에서 얻어진 분해능 보다 에너지 분해능이 덜 좋게 나타난다. 보통 크기는 1-5 cm²이다. 실제 반도체 검출기를 제조할 때에는 공핍층의 더욱 확대하기 위해 p형 Si 또는 Ge 반도체에 Li를 확산시키는 방법을 사용한다. 이러한 검출기를 "Li drifted 반도체 검출기"라 하며 Ge(Li), Si(Li)으로 표기한다. Si(Li)는 상온에서 수주동안 보관이 가능하나 Ge(Li)는 사용 시 뿐 아니라 보관할 경우에도 항상 냉각을 시켜주어야 한다. Si(Li)는 X-선 측정용으로 Ge(Li)는 감마선 측정용으로 주로 사용된다.

근래에는 Ge의 불순물 정제기술이 발달하여 Ge(Li) 대신에 "고순도 Ge 검출기(High Purity Ge detector, HPGe)"가 널리 사용된다. Ge(Li)는 상온에서 Li이 이동하기 때문에 항상 액체질소로 냉각해야 하는 부담이 있는 반면 HPGe는 열전자에 의한 잡음을 줄이기 위해 사용 중에만 냉각하면 된다. 일반적으로 검출효율과 에너지 분해능과 같은 가장 중요한 성능 특성은 같은 크기의 Ge(Li)과 HPGe에 대해서는 거의 일치한다. 또한 HPGe 검출기는 NaI(Tl) 섬광 검출기에 비해 에너지 분해능은 매우 우수하기 때문에 NaI(Tl) 섬광 검출기로서는 분해할 수 없는 다수의 감마선을 분리할 수 있다. 따라서 복잡한 에너지 스펙트럼을 갖는 감마선분광학에서는 현재 모두가 HPGe 검출기가 사용되게 되었다.

CdTe 검출기는 실온 동작을 가동하게 하는 충분한 띠 간격 에너지(1.52 eV)와 비교적 원자번호가 큰 값을 가지고 있다. CdTe은 단위 길이당 광전흡수의 확률은 자주 사용되는 감마선 에너지에 대해서 Ge 보다 4-5 배, Si의 경우 전형적인 감마선 에너지에 대한 것보다 100 배가 크다. 따라서 이 물질은 단위 체적당 감마선 효율이 중요한 경우에 많이 이용된다.

HgI₂는 X-선과 감마선에 대해 퍼텐셜검출기로서 상당한 주위를 끌었던 또 다른 물질이다. HgI₂ 검출기는 띠 간격 폭이 2.13 eV인 반도체 물질로 이루어져 있다. 수은의 단면적 때문에 저에너지 상호작용 확률은 Ge 검출기의 50배 정도로 크다. 이 점에서 HgI₂ 검출기는 CdTe 검출기보다 훨씬 더 효율적으

로 광자를 검출할 수 있는 장점이 있다. 하지만 광범위하게 응용하는데 몇 가지 제한이 있어 검출기 개발은 연구단계에서 크게 벗어나지 못하고 있다.

CdZnTe(CZT)는 띠 간격 폭이 1.53 eV와 1.64 eV로 상온에서 감마선을 감지할 수 있을 정도로 열여기된 전자정공쌍이 적다. 그러나 가격 경쟁력을 갖추기 위해서는 비저항이 작은 CdZnTe를 이용하여 에너지 분해능과 공간 분해능이 높은 감마선 검출기를 만들어야 하며, 이를 위해서는 높은 바이어스에 서 낮은 누설전류를 갖도록 해야 한다.

그 밖의 반도체 검출기로 GaAs, InP, CdSe PbI₂, GaSe 등의 검출기가 있는데 이들은 에너지 갭의 간격이 커서 냉각하지 않고 상온에서 사용할 수 있는 장점이 있으나 에너지 분해능이 좋지 않으며 결정을 키우는데 한계가 있다는 약점이 있다.

5. 결론

방사선 검출기의 분류는 반응하는 물질에 기준하지만 방사선과 물질 상호 반응으로 생성되는 전자에 기초하는 점은 모두 동일하다. 최근의 방사선 검출기는 방사선 정보를 보다 정확하게 감지할 수 있는 반도체 검출기 분야에 대한 연구가 활발하지만 대면적을 요구하는 경우에 기체검출기가 유리한 것과 같이 어떤 목적으로 사용하느냐에 따라서 각각의 검출기가 가진 장단점이 존재한다. 21세기에는 인간을 중시하는 사회적 요구가 증대됨에 따라 의료 분야에서 진단, 암치료 등과 관련된 효율적 방사선 이용의 필요성이 증대되고 있으며 또한 지구환경에 대한 관심이 커짐에 따라 환경 방사선의 측정의 중요성이 대두되고 있기 때문에 고효율, 고성능을 가진 방사선 계측기에 관한 연구는 더욱더 활발하게 이루어질 것이다.

참고 문헌

- [1] A. Oed, " Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with

gases", Nucl. Instr. Meth., A263, 351(1988)

[2] G.D. Minakov, "Performance of gas microstrip chambers on glass with ionic and electronic conductivity" Nucl. Instr. Meth., A326, 566(1993)

[3] F. Angelini, "The micro-gap chamber", Nucl. Instr. Meth., A335, 69(1993)

[4] S.F. Biagi, "The microdot gas avalanche chamber: an investigation of new geometries", Nucl. Instr. Meth., A361, 72(1995)

[5] F. Sauli, "GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors", Nucl. Instr. Meth., A386, 531(1997)

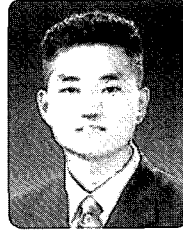
[6] Hyo-Sung Cho, "Development in the Design and Performance of Gas Avalanche Microdetectors(MSGC, MGC and MDOT)

[7] Bicron Crystal Products, "Physical Properties of Common Inorganic Scintillators", 2000. 2

[8] G. F. Knoll, " Radiation Detection and Measurement", 2nd ed. (J. Wiley & Sons, New York, 1989).

[9] N. Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation", 2nd ed. (Taylor & Francis, 1995).

저자약력



성명 : 강상묵

- ◆ 학력
- 2000년 연세대 의공학과 공학사
- 2003년 연세대 대학원 의공학과 공학석사

- ◆ 경력
- 2003년 - 현재

한국원자력연구소 방사선계측기 Lab. 연구원



성명 : 김용균

- ◆ 학력
- 1985년 서울대 물리학과 이학사
- 1988년 서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 1994년 서울대 대학원 물리학과 이학박사

- ◆ 경력
- 1994년 - 1995년 한국원자력연구소 post doc.
- 1995년 - 2003년 한국원자력연구소 선임 연구원
- 2003년 - 현재 한국원자력연구소 방사선계측기 Lab. 책임연구원

