

半導體放射線檢出器

鄭 汝 奎

原子力研究所 物理學研究室
(Received November 28, 1969)

§ 1 序 論

半導體檢出器의 出現은 約10年前의 일이었으나 出現한 그 當時에는 檢出器의 크기가 너무나 微小하여 α -粒子나 核分裂片과같이 物質內에서의 飛跡이 매우 짧은 重荷電粒子의 檢出에만 使用될 수 있을 程度로 그 用途가 極히 制限되었으나 1963年을 前後하여 새로운 原理에 立脚한 半導體檢出器가 開發되어 檢出器의 容積이 큰것이 製作可能하게 되면서 부터 高 energy β 및 γ 線까지도 그 energy를 精密하게 測定할 수 있게되어 最近數三年來 一躍脚光을 받아 檢出器自體의 開發과 核科學에의 應用面에서 多같이 急速한 進展을 보게되었다. 以下 簡略하게 半導體檢出器의 動作原理와 應用面의 一端을 紹介하여 核科學徒에게 一助가 되고자 한다.

放射線檢出에 使用되는 檢出器는 그 檢出對象으로 하는 放射線의 種類나 또測定하고자하는 物理量의 性質에 따라 그型이 多樣하며 또한 測定目的에 따라서 檢出器에 要求되는 特性도 一律的은 아니다. 따라서 放射線檢出器의 性能의 優劣을 낮까지 簡單한 基準만으로 決定지울수는 없겠으나 틀림없이 適用될 수 있는 共通의 基準은 高 energy 分解能과 高檢出效率를 兼備하고 測定에 所要되는 時間이 짧으면 우선은 優秀한 測定器라고 認定할 수 있다. 半導體檢出器가 成功的으로 使用되기 以前에도 energy 分解能이 極히 높은 curved crystal spectrometer나 magnetic spectrometer 등이 考案되어 核實驗에 많은 貢獻을 한것도 事實이나 이들은 檢出效率(즉 檢出器에 入射한 放射線數에 對한 實地로 檢出된 放射線數의 比)이 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度로 작아서 特定한 實驗目的 以外에는 使用되지 못하였으며 一方 現在까지도 가장 널리 使用되고 있는 NaI scintillation 檢出器는 檢出器의 檢出效率가 100% 가깝게 높지만 energy 分解能이 7~8%에 머무르고 있어 精密測定에는 適合하지 않았다. 그나마도 NaI는 γ -線 energy 分光에 所要되는 時間이 짧아(multi-

channel mode라고 稱함) energy 分解能에 不足한 點이 있어도 가장 널리 多方面에 使用되어 왔으나 前記한 curved crystal spectrometer 등은 energy 別로 그 計數率을 일일이 段階的으로 測定하여야 하기 때문에(single channel mode라고 한다) 現在核物理學의 研究趨勢의 하나인 短壽命核測定에의 使用에는 많은 隘路가 있었다. 이와같은 여러 測定器들의 短點을 어느程度 cover 하도록이한 性能을 지닌것이 半導體檢出器라 하겠다.

§ 2. 半導體檢出器의 動作原理와 種類

半導體檢出器는 氣體電離函에서 氣體代身 固體半導體(現在로는 Si 또는 Ge)를 使用한 것이라 생각하여도 無妨할 程度로 그 動作原理가 서로 類似하여 때로는 半導體檢出器를 固體電離函이라고도 부른다. 氣體電離函에서는 陽陰兩極間에 電場을 걸어 그안에 있는 氣體內를 放射線이 通過할때 電離作用으로 生成시킨 電子-ion 雙을 電場의 힘으로 分離하여 電子와 ion 들을 各各 反對의 極性을 가진 電極으로 收集시킴으로서 電極電位의 變化또는 電離電流로서 檢出하도록되어 있는데, 半導體檢出器에서는 電子-ion 代身 放射線에 依해서 傳導電子와 正孔의 雙을 吸收한 放射線의 energy 에 比例하는 個數만큼 만들어 낸다. 이들 電子-正孔雙을 電場의 힘으로 分離하여 外部回路에 電氣信號로서 나타나게함은 氣體電離函의 경우와 同一하다. 上述한 바와같이 動作原理에 있어서는 兩檢出器사이에 別로 差異가 없겠으나 다음과 같은 理由로 해서 半導體檢出器가 氣體電離函이나 檢出器보다 性能이 卓越하다 하겠다.

i) 氣體의 경우 한雙의 電子-ion 을 만드는데 要하는 energy 즉 ϵ 值가 表 1에서 보는바와 같이 約 30 eV 인데 比하여 半導體의 경우에는 Si 일때 約 3.5eV, Ge 때 約 2.8eV 이면 한雙의 電子-正孔을 生成시킬수가 있다. 이와같이 같은 放射線 energy 量의 吸收에 對하여 半導體의 경우에는 氣體에 比하여 約 10倍의

電荷量을 생성시키는 결과가 되어 出力 pulse 波高의 높이도 역시 10배가 된다. 그런데 檢出器의 energy 分解能은 出力波高值의 平方根에 比例함으로 半導體의 경우가 氣體보다 約 3배는 더 좋다는 結論을 얻는다. 表 1에는 表示되어 있지 않으나 NaI의 경우와 比較하여 보는 것도 興味가 있다. NaI Scintillator에 있어서는 周知하는 바와같이 NaI에 依한 放射線 energy의 吸收로 可視領域의 螢光을 내며 이 螢光이 光電子倍增管의 光陰極에서 光電子를 NaI가 吸收한 放射線 energy 量에 比例하는 個數만큼 發生시키는데, 光陰極에서 單한個의 光電子를 放出시키는데 要하는 平均吸收 energy (NaI에서)가 約 300eV나 됨으로 半導體檢出器의 energy 分解能은 NaI에 比較해서 적어도 10배는 더 좋아진다는 말이 된다.

ii) 어떤 物體內에서 放射線이 만들어내는 電子-ion 雙(半導體의 경우에는 電子-正孔雙)의 數의 分布는 入射放射線 energy $E(\text{MeV})$ 가 一定한 값이라도 어떤 統計分布를 나타내게 된다. 이 統計分布는 Poisson 分布보다도 一般적으로 좁은 分布를 갖게 되는데 物體에 따라 各其特有한 分布幅을 갖고 있다. 그리하여 이들 分布가 Poisson 分布보다 어느 程度 좁은 分布幅을 갖는가를 表示하는 尺度로서 Fano 因子라고 하는 因子 F 를 定義하고 있다. 그런데 檢出器의 energy 分解能과 Fano 因子 사이에는 表 1의 5 行에 表示되어 있듯이 $2.35 \sqrt{FE}$ 라는 關係가 있음으로 F 値가 작을수록 分解能이 向上되는데 氣體에서는 $1/2 < F < 1/3$ 이고 半導體인 Ge에서는 $0.13 < F < 0.19$ 임으로 統計分布에서도 半導體檢出器가 亦是 좋은 energy 分解能을 갖임을 알 수가 있다.

iii) 半導體의 密度는 氣體의 約 1000배 程度나 클므로 같은 energy의 放射線을 完全吸收하는데 要하는 두께가 氣體의 1/1000이면 足함으로 小型으로도 充分한 energy 解析이 可能하다.

iii) 傳導電子와 正孔을 電極으로 收集하는데 所要되는 時間이 10^{-9} 秒 程度이나 氣體電離函에서는 10^{-7} 秒 程度로 훨씬 긴 時間을 要한다. 收集時間이 짧다는 것은 곧 그만큼 高速計數가 可能하다는 것을 뜻한다. Fig. (1)에 좀더 仔細히 半導體檢出器에 加한 印加電壓에 따르는 100% 電子-正孔雙을 收集하는데 所要되는 時間의 變化를 圖示하였다. 이 그림에서 W 는 檢出器의 두께를 縱軸과 橫軸은 各各 收集되는 正孔-電子雙의 % 量과 所要時間을 表示한다. 또한 a, b, c, d, ... 는 放射線이 半導體內에서 만들어낸 電子-正孔雙의 發生位置를 나타내며 a, b, c, ... 順으로 收集電極에 가까운 距離를 表示한다.

以上 몇 가지 主要한 長點을 氣體電離函의 경우와 比較하여 論하였으나 一方 短點이 없는 것도 아니다. 우선 들 수 있는 것이 半導體檢出器製作에서 素材로 使用될 Si 또는 Ge 單結晶의 容積이 現在 集中的인 努力이 傾注되고 있음에도 不拘하고 100cc 程度를 넘지 못하고 있어 γ -線과 같이 透過力이 강한 放射線에 對한 檢出效率이 NaI에 比하여 相當히 未滿하며 또한 熱 energy에 依한 電子-正孔의 發生으로 檢出器 使用時에는 液體窒素溫度로 維持하여야 한다던가 中性子 또는 重荷電粒子에 依한 放射線損傷等等을 短點으로 指할 수 있다.

半導體는 그 名稱이 나타내듯이 絶緣體가 아니므로 單純히 半導體에 電壓을 加하면 많은 電流이 흘러 放射線에 依하여 생긴 微小電流은 그 속의 파묻혀 識別한 道理가 없다. 따라서 檢出器製作의 要諦의 하나는 放射線入射가 없을 때 電流이 흐르지 않도록 하여야 하는 것이다. 다음 例示한 半導體檢出器는 그 如한 點이 解決을 본 代表的인 測定器型이다.

(i) P-N 接合型 半導體檢出器

P型 半導體와 N型 半導體의 接合部(Junction)에는 空乏層(depletion layer)이라는 荷電運搬體가 없는 高抵抗層이 接合面兩側에 생기며 P-N 接合에 逆電壓 V 를 걸면 이 空乏層(때로는 眞性領域이라고도 한다)의 두께 d 는 V 의 自乘根에 比例하여 커진다. 따라서 逆印加電壓 V 를 매우 크게 하면 測定器로서의 役割을 하여주는 이 層의 두께가 任意로 크게 될 수도 있을 것 같으나 實地로는 接合部破壞를 招來하여 $d \sim 1\text{mm}$ 를 넘지 못한다. 印加電壓의 殆半은 이 空乏層에 걸리게 되며 空乏層에 放射線이 入射하였을 때 이 放射線의 飛程이 空乏層보다 짧은 短飛程荷電粒子이라면 이 層內에서 結局 energy를 全部 잃게 되고 따라서 放射線 energy에 比例하는 出力 pulse를 얻게 된다.

(ii) 表面障壁型(Surface Barrier 型) 半導體檢出器 N型 Si 半導體表面에 金を 蒸着시키 이 兩者間에 逆電壓을 걸어주면 金屬面下에 P-N接合部에서와 마찬가지로 印加電壓 V 의 自乘根에 比例하는 두께를 가진 空乏層이 생겨 放射線檢出器로서의 役割을 하여 준다. 이 경우에도 (i)의 경우와 같이 實地로는 印加電壓에 限界가 있어 $d \approx 1\text{mm}$ 以上은 實現되기 어렵으나 放射線入射面이 매우 얇은 金の 蒸着層이기 때문에 放射線이 檢出器로서의 役割을 하여주는 空乏層에 들어갈 때까지의 energy 損失이 매우 작아 特히 α 粒子나 fission fragment의 測定에 有利하다.

(iii) p-i-n 型(Lithium Ion Drift 型) 半導體檢出器 上述한 두 가지 檢出器는 다같이 空乏層의 두께가

1mm未滿이어서 高 energy 粒子나 r 線에서는 飛程이 空乏層보다 훨씬 길어서 空乏層內에서 入射放射線의 全 energy를 吸收케할수가 없으며 따라서 energy 解析에는 이들 放射線에 對하여는 適用시킬수가 없다. 이러한 難點을 解決하기 위하여 出現한것이 Lithium Ion Drift 原理로서 低抵抗半導體素材에 不純物을 擴散시켜 人爲的으로 두터운 空乏層(眞性領域)을 1cm 程度의 두께까지 만들었다. 좀더 仔細히 p-i-n 型 이라고 불리는 檢出器의 原理를 說明하자면 Fig(2)에 圖示한바와 같이 Ge를 例로 들자면 (Si도 거의 같다) 現在 使用되고있는 方法은 P-型 Ge 半導體에 Li-ion 을 drift 시킴으로서 두터운 眞性領域을 얻고있다. Li-原子는 4價의 Ge-半導體結晶中에서 높은 易動度를 갖는 格子間 donor 原子이다. Li을 P-型 Ge 結晶體表面에 塗布 또는 蒸着시켜 約 400~450°C 程度로 熱擴散시키면 結晶中에 들어가서 正 ion 化하여 높은 表面濃度를 갖는 層을 形成하게 되며 Li-ion 濃도와 元來結晶體中에 있었던 acceptor 不純濃도가 같은곳에 P-N 接合部가 생긴다. 그다음 過程은 소위 drift process 라고 말하고있는 過程으로서 P-N 接合體를 40°C 內외의 溫度로 維持한채 逆 bias 電壓을 걸면 Li-ion 은 電場의 힘으로 N 側으로부터 P 側-으로 移動하며 移動하는 途中에 acceptor ion 인 負 ion 과 電氣的으로 結合되어 그自體가 電氣的中和狀態가 된다. 다시 말하면 荷電運搬體가 없는 眞性領域을 만들어주는 것이다. 이러한 過程을長時間繼續하면 眞性領域(i領域이라 함)이 漸次 넓어져 終局에가서는 兩面에 p와 n의 얇은 層만을 남기고 그 사이에 Sandwich 된 部分은 全部 i-領域으로 바뀌어 檢出器의 檢出部分이되는 것이다. Si도 Ge와 거의 動作原理는 같으나 Ge로 p-i-n型을 만들면 Si보다 原子番號가 큼으로 r 線에 對한 光電吸收係數가 Si 때보다 훨씬 커서 γ 線의 energy 測定에 훨씬 좋은 energy 分解能을 얻을수 있음은 이미 論한바와 같다. 한가지 Ge-p-i-n 型의 두드러진 短點은 Ge中에서 Li가 常溫에서도 繼續하여 擴散되어 反對面(P面)에 까지 到達蓄積되어 檢出器로서의 機能을 잃게됨으로 恒時液體窒素程度의 低溫으로 冷却시켜주어야한다는 點이다.

以上 紹介한 세가지 檢出器型을 性能別로 알기 쉽게 整理한것을 第2表에 表示하였다.

§ 3. Ge(Li) 檢出器

P-i-n 型 Ge 檢出器를 Ge(Li) 檢出器라 略記하는 것

이 通例로되어있다. 大略의 原理에 對해서는 §2에 記述하였으나 이 檢出器야말로 半導體檢出器로 하여금 時代의 寵兒로 만들수있었던 것이며 또 가장 應用面에서 重要한 役割을 하고있기에 좀더 仔細히 紹介하여 보고저한다.

Ge(Li)檢出器는 平板型(planar) 과 同軸型(Coaxial 型)으로 우선 大別된다. 平板型은 n層과 p層平板사이 에 i層이 sandwich 型으로 끼어있는 模樣을 하고 있으며 現在 最大斷面積 20cm² 最大 i層의 두께가 1cm 程度 따라서 容積으로 換算하여 20cc의 檢出器가 製作되고 있다. 이型의 短點은 큰 容積의 檢出器 製作이 어렵다는 點이다. 그 理由는 Fig(3)에서 보는바와같이 適正 drift 溫度인 40°C에서 100V의 逆 bias 電壓으로 Li-ion 을 drift 시켰을때 繼續하여 1個月을 drift 시켜야 i層의 두께가 不超過mm밖에는 成長하지 않음을 보여주고 있다. drift depth는 所要時間의 自乘根에 比例함으로 1cm 以上の 두께의 領域을 얻는다는것은 實質的으로 不可能하다. 따라서 Fig(4)에 圖示한 바와같이 圓柱의 外周로부터 中心軸을 向하여 Li-drift를 施行하여 얻는 所謂 同軸型은 큰 檢出容積을 얻기 위하여 考案된 것이며 例를 들어 直徑 5cm 이고 길이 10cm의 Ge單結晶을 外周로부터 1cm 길이까지 drift 시켜 i層을 만든다면 檢出體積이 125cc 나 되는데 所要時間은 平板型에서 1cm 두께까지 drift 시키는 것과 같다.

同軸型檢出器에는 Fig(4)의 (a), (b)에서 보는 바와같이 兩端開放(double-open-ended)와 一端開放(single-open-ended)型의 두型이 있다. 一端開放型에서는 더 큰容積이 얻어지기는 하나 閉端部의 電場이 不均一하여 pulse의 rise time이 電子-正孔雙이 만들어지는 場所에따라 달라져 고르지 못하다는 缺點이 있어 正確度を 要求하는 同時計數時間分解能의 低下를 招來한다. 이런 意味에서 最近來에는 主로兩端開放型이 人氣가 있다. 한편 同軸型檢出器의 中心軸을 둘러싼 P-層은 檢出器로서 作用하지 않는 不必要한 部分일뿐 아니라 r -線을 散亂시켜 Pulse 波高分布의 Compton background를 增加시킴으로 이 不必要한 P-core를 除去하여 Well-type로 만드는 일도 試圖되고 있다.

다음에 Ge(Li) 檢出器製作에 所要되는 Ge 素材에 對하여 若干言及하자면 그 性能으로서 要求되는 事項은 P-型 單結晶으로서 Li-drift velocity가 빠르고 drift 進行中 leakage 電流가 작고, Li의 析出이 늦고 結晶缺陷이 可及的 적어야 좋은 分解能을 갖는檢出器를 만들수가 있다. 아직도 좋은 分解能을 갖는

檢出器製作을 可能케하는 素材가 지녀야할 具體的條件이 不分明한 現實이며 따라서 여러곳에서 Ge單結晶을 만들고 있으나 文獻에 나와 있듯이 全世界에서 數個社의 製品만이 檢出器製作에 適切한 것으로서 認定받고 있다.

以上 主로 檢出器自體와 그 素材에 對해서만 言及하여 왔는데, 實은 Ge(Li)半導體檢出器의 出現으로 核分光學, 放射化分析等に 革命的인 轉機를 마련하였지만 그 功勞의 一部는 이와 併行하여 發達되어온 electronics에 歸依하여야만 한다. 例를 들어 Field Effect Transistor (FET)의 開發이 없었던들 1MeV

의 γ -線을 不過 0.2KeV의 半幅值로 測定한다는 것은 Ge(Li)만으로는 도저히 不可能한 作業인 것이다 在來의 NaI와 比較하여 Ge(Li)의 優秀性을 一目瞭然하게 알수있는 γ -線 energy spectrum을 Fig(5)와 Fig(b)에 圖示하였다. Fig(5)의 上圖는 Gd¹⁶¹을 NaI로 取한것이며 下圖는 같은 γ -線源을 2mm 두께의 Ge(Li)平板型檢出器로 取한 것이다. Fig(6)은 Sm¹⁴⁹의 熱中性子捕獲 γ -線을 역시같은 Ge(Li)檢出器로 測定한 例이다.

Gas 電離器 · Silicon檢出器 · Germanium 檢出器의 比較

	Gas 電離器	Silicon 檢出器	Germanium 檢出器
ion pair 하나를 만드는데 要하는 電離 energy ϵ (eV)	≈ 30	3.5~3.6	2.8~2.9
energy E(MeV)의 放射線에 의하여 生기는 電荷量 (coulomb)	$5.33E \times 10^{-21}$	$4.44E \times 10^{-20}$	$5.72E \times 10^{-12}$
Fano factor F	$1/2 < F < 1/3$	$F \approx 0.10$	$F \approx 0.129 \sim 0.19$
半幅值 分解能 (keV) $2.35\sqrt{FeE}$	$(7.43 \sim 9.1)\sqrt{E}$	$< 3.15 \sqrt{E}$	$2.43 \sqrt{E}$
electron 易動度 μ_e (cm ² /V 秒)		1350(25°C) 4×10^4 (77°C)	3900(25°C) 3.6×10^4 (77°C)
hole 易動度 μ_h (cm ² /V 秒)		480(25°C) 1.8×10^4 (77°C)	1900(25°C) 4.2×10^4 (77°C)

半導體檢出器의 種類

種 類	Surface Barrier 型	P-N Junction 型		Lithium Drift 型			
		Thick	$\frac{dE}{dx}$	Si(Li)		Ge(Li) p-i-n	
				Surface Barrier	p-i-n	平板型	同軸型
製 法	① n型 Si表面을 etching한 뒤 gold를 蒸着 ② 高溫處理 不要 ③ 좋은 檢出器를 만들 收率 이 낮다.	① P型(or n型) 半導體에 n-型(or p型)不純物을 擴散 시킨다. ② 1000°C 內외의 高溫處理 必要 ③ 좋은 檢出器를 만들 收率 이 크다.	① 根本原理는 P型半導體에 Lithium을 擴散시킨 後, 加熱, 加電壓 ② 400~600°C의 高溫處理 必要				
眞 性 領 域	$d = 0.505\sqrt{\rho V}$ micron ρ : n-Si의 比抵抗 V: bias 電壓 $d_{max} \approx 1mm$	$d = 0.31 \sqrt{\rho V}$ ρ : p-Si의 比抵抗 V: bias 電壓 $d_{max} \approx 1mm$	d는 檢出器製作時의 drift 時間으로 決定되며, 電壓依存性은 거의 없다. Ge(Li)의 경우 $d \approx 10mm$, Volume max $\approx 100cc$				
利 分 用 野	短飛程 荷電粒子 (α, f)	短飛程荷電粒子 (α, f)	荷電粒子識別	e, β , x線 soft γ		γ	

§ 4. 後 記

半導體檢出器의 歷史는 日淺하나 短時日內에 集中的인 開發이 이루어져 그全貌를 制限된 紙面에 紹介하기란 無理한 일이므로 여기에는 氷山の 一角이라 할까 極히 原理的인것의 入門만을 紹介하였다. 原稿督促에 쫓기듯 썼기 때문에 未洽하지 않은 곳이 없으나 조금이라도 讀者에게 一助가 될 수 있다면 多幸이며 未洽한 點은 다음의 文獻을 參照하여 주셨으면 한다.

文獻(綜合的인 것)

- (1) J.M. Hollander; Nucl. Instr. & Methods 43 (1966) 65-109
- (2) J.W. Mayer; ibid 43 (1966) 55-64
- (3) F.S. Goulding; ibid 43 (1966) 1-54
- (4) H.M. Mann; ANL-7282 (1968) 118-187
- (5) G. Dearnaley & D.C. Northrop; Semiconductor Counters for Nuclear Radiations. (1963) John Wiley, Inc.
- (6) 放射線計測技術에 關한 symposium 普文集 (1969) 原子力廳·韓國原子力學會 共同刊行

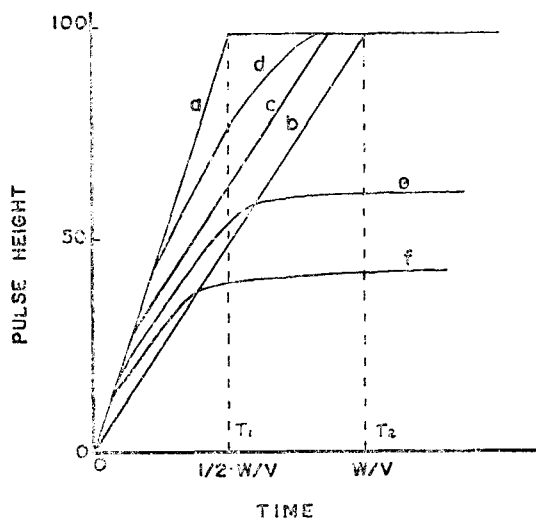


Fig. 1

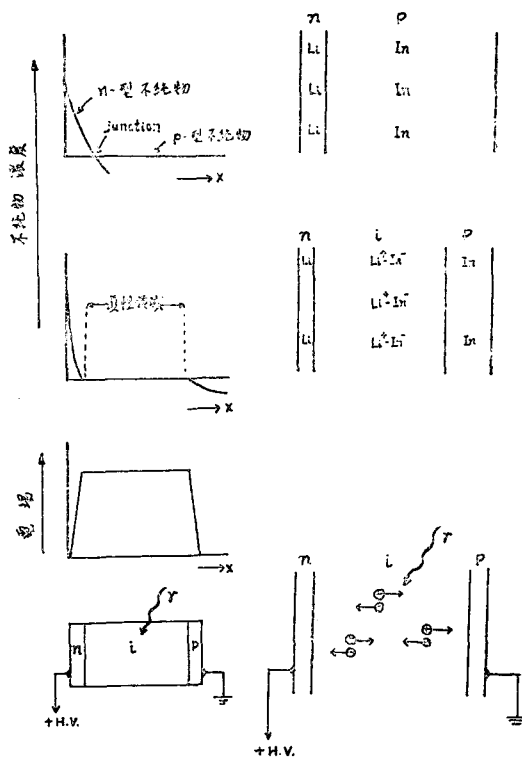


Fig. 2

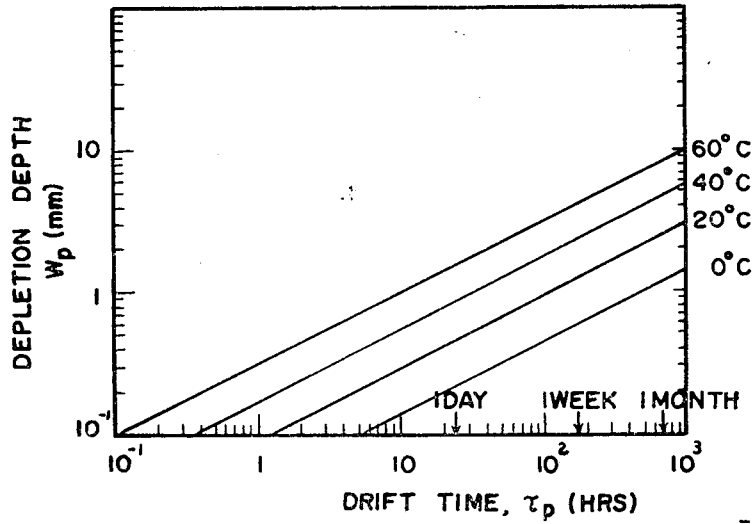


Fig 3

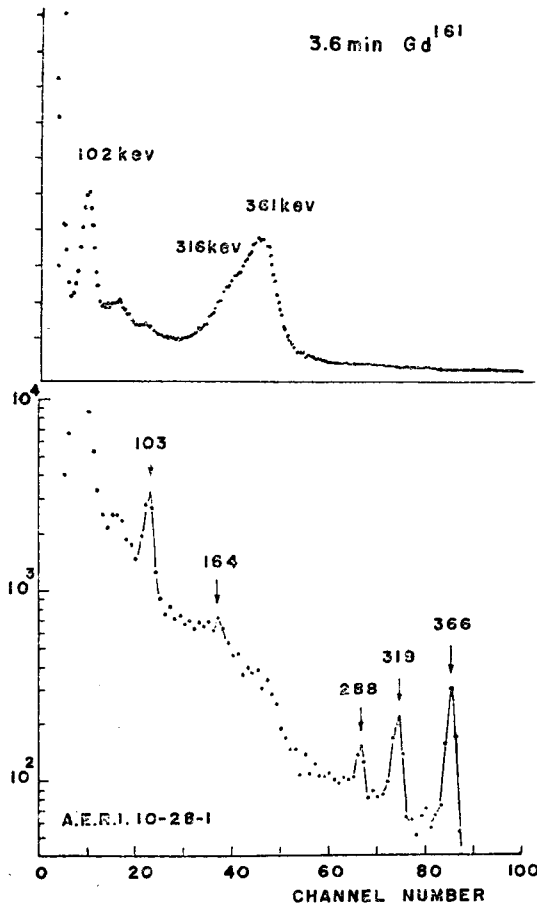


Fig. 5

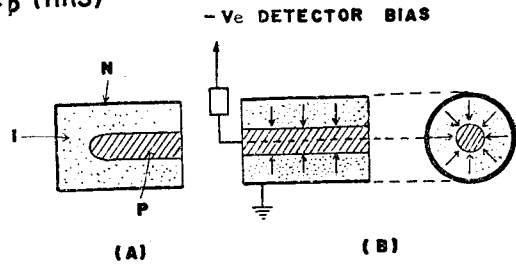


Fig 4

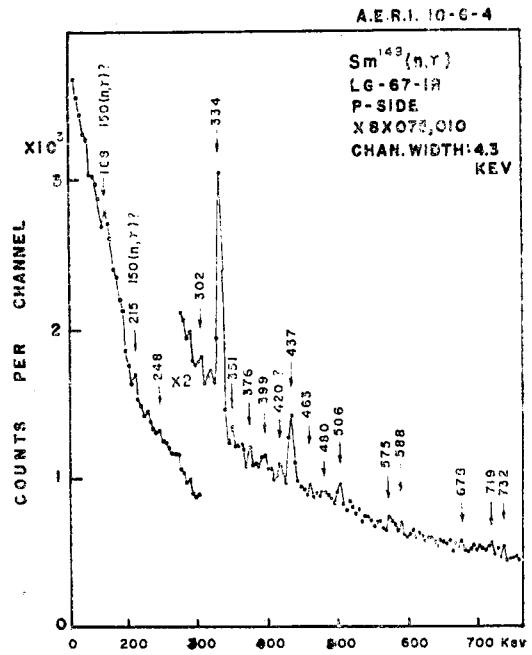


Fig. 6