

半導體를 利用한 放射線檢出器

鄭 萬 永

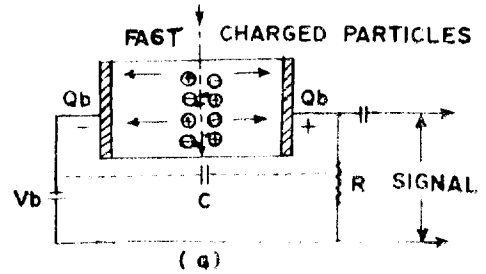
1. 序 論

一般的으로 固體를 荷電粒子的 檢出器로서 利用하려는 것은 오래 前부터 試圖되었다. 그것은 1940年代 後半에 많은 사람들이 diamond, AgCl, CdS, ZnS, SiC 등의 絶緣體를 利用한 ionization detector 를 만들려고 努力하였으나, 絶緣體內的 electron 의 trapping effect 때문에 實用化를 못 보았다.

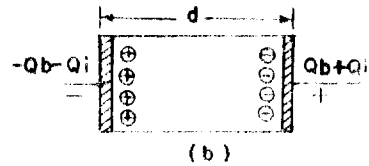
한편 1948年을 前後하여 Schokley group의 半導體 研究와 함께 K.G. McKay¹⁾는 Ge 半導體(grown p-n junction diode)를 放射線計測에 쓰려는 方向으로 처음 研究에 着手하였으나 分解能이 나쁘고 實効面積이 작아 지 成功하지 못 했다. 그 後 繼續을 못 본새, 1956年代에 다시 J.W. Mayer, B. Gossick²⁾等에 依하여 p-n junction 또는 Ge, Si 등의 surface potential barrier 部分을 ionization detector로 利用하려는 努力이 始作되어서 1953³⁾年에서 1960年에 이르러서는 各 方面에 次第로 實用化 研究에 着手하였다. 이 時期에는 transistor 를 비롯한 各種 半導體 製品을 많은 半導體工業의 技術이 背景에 있었으므로 오늘날과 같은 半導體를 利用한 放射線檢出器를 만들어 그 性能을 次次 向上시켜 α 線, proton 등의 荷電粒子만이 아니라 中性子, β 線⁴⁾, γ 線⁵⁾ 利用으로도 그 應用分野를 날로 擴張되어 가고 있다. 現在까지는 α 粒子的 檢出에는 가장 適合하고, 또 쉽게 中性子(n, α)의 檢出에도 利用할 수 있으므로 原子核 實驗뿐만 아니라 原子爐工學, 核燃料工業에 커다란 轉換點을 招來한 것이다.

2. 動作原理와 檢出器에 要求되는 材質

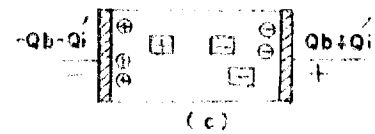
자주 그림 1(a)와 같이 容量 C로 되어 있는 結晶體 內에 高速荷電粒子的가 入射되면 電離作用에 依하여 많은 電子, 正孔雙을 일으키는데 그 勢力を 消失한다. 이때 이 結晶體內에 생긴 電子, 正孔雙의 各 電荷를 $Q_e, -Q_h$ 라고 하면, 이들은 兩 電極間에 걸려 있는 電場에 따라서 反對方向으로 移動하는 結果 兩電極에 誘起되는 最終出力信號電壓은 外部回路의 時定數 RC가 充分히 크면 $-\frac{Q_e}{C}$ 로 表示된다. 이때 Q_e 가 入射荷電粒子的의 勢力



(a)



(b)



(c)

그림 1. 動作과 原理

에 完全히 比例하면 그림 1(b)와 같이 入射勢力에 比例한 出力을 얻을 수 있다. 그러나 그림 1(c)의같이 一部の 電子 또는 正孔이 結晶體內의 格子缺陷에 依하여 捕捉되니가 再結合되는 것이 있어서 電極까지 到達할 수가 없는 것이 생긴다. 따라서 그때의 出力은 $\frac{Q_e}{C}$ 로 되어지 入射荷電粒子的의 勢力에 比例하지 않게된다.

放射線 檢出器로 쓸 수 있게 하려면 以上의같은 障害物을 除去하지 않으면 안된다. 그렇게 하기 위해서는 結晶體의 두께: $d(\text{cm})$, 結晶體內에서 생긴 電子 또는 正孔이 捕捉中心에 陷힐 때 까지의 平均時間: $\tau(\text{sec})$, 結晶體內의 電子 또는 正孔의 移動度: $\mu(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec})$, 結晶體內의 電場의 세기 $E(\text{V}/\text{cm})$ 사이에 다음과 같은 關係가 있어야 한다.

$$\tau \cdot \mu \cdot E > d$$

그런데 d 는 檢出器로서 큰 勢力에서 檢出할 수 있게

하기 위해서는 필수록 큰 것이 좋다. 따라서 檢出器材料에 要求되는 것으로서 다음의 같은 條件을 얻을 수 있다.

- (i) 檢出器에 充分히 강한 電場을 받을 수 있을 것.
- (ii) 檢出用 結晶體의 電子 또는 正孔에 對한 移動도와 平均 壽命의 積이 充分히 큰 것.

여기서 (i)의 條件은 絶緣性이 높으면 充分히 큰 電場을 結晶體內에 받을 수 있으나 實際 Ge, Si 같은 것은 表面障壁 또는 接合型으로서 可能하다. (ii)의 條件은 表1과 같이 μ + diamond 以外에는 Ge, Si의 1/10乃至 1/70 程度로 적고 τ 는 10^4 乃至 10^6 sec 程度로 작다.

材 質	$\mu(25^\circ C)$		$\tau(\mu sec)$	Eg(ev)	$\epsilon(ev)$
	Electron	Hole			
Si	1600	400	$\sim 10^5$	1.1	3.5
Ge	3800	1800	$\sim 10^6$	0.72	2.8
GaAs	3500	350	~ 1	1.35	6.3
PbS	600	250	10^2	0.4	
Diamond	1800	1200	10^3	6.	18
CaS	210	~ 20	$10^2 \sim 10^3$	2.5	7.3

表 1. 材質定數表

여기서 diamond 外는 τ 가 작으므로 檢出器材料로서는 Si, Ge가 가장 좋은 것이라 하는 것을 알 수 있다. 이와같이 Si, Ge의 τ 가 매우 큰 것은 transistor 製作技術 向上된 그 精製法의 進歩에 起因한다고 볼 수 있다.

그러나 이러한 Si, Ge에서도 充分히 큰 電場을 받을 수 있게 하려면 結晶體內에 흐르는 補洩電流이 작아야 한다. 이것은 雜音의 原因이 되므로 이 點에서는 많은 特徵를 相繼하게 된다. 그러므로 이러한 點을 改良하기 위하여는: 後述하듯 其他같은 여러가지 施工이 加해지고 있다.

3. 各種 半導體 檢出器의 構造 및 特徵

初期의 半導體檢出器 材料로서는 Ge의 Gold-Germanium Counter として 사용되었으나 Ge는 表面酸化膜이 強導電性을 나타내지 않은 逆電壓을 걸지 못하고 熱的으로 不安定해서 實用化되지 못한해 거의 Si 으로 代置되었다. 한편 높은 逆電壓을 걸 수 있게 하기 위하여 表面障壁型(Surface barrier type)과, $p-n$ 接合型($p-n$ junction type) 및 이 둘 다 改良하여 中間에 眞性半導體(Intrinsic) 部分을 通越하여 計數有效領域의 크기를 增大한 $p-i-n$ (Li drifted $p-i-n$ junction type) 등이 實用化되고 있다. 이 以外에도 photo transistor 方式로서 gain, S/N를 크게 하려고한 것이 있으나 이것으로서 resolution이 나쁘고 rise time이 數 $10 \mu sec$ 가 되어서 成功하지 못했다. 따라서 여기에서는 前記 3者에 關하여 더 그 構造와 動作原理의 差異點을 말하겠다.

가) 表面障壁型

그림 2(a)와 같이 n type silicon 表面에 Au 薄膜을 蒸着시키면 n type silicon의 表面近方에서 導電帶(Ec)에 存在하던 電子가 表面準位에 捕捉되어 表面의 電子에 對한 電位가 올라가서 導電帶의 電子를 表面에서 속으로 밀어 넣음으로 電導性이 없는 正의 不純物 “이온”으로만 되는 空間電荷層 W가 생긴다. 따라서 이 部分은 마치 p type 와 같은 作用을 하게 되는데 거기에 다 그림 2(b)와 같이 外部로 부터 逆 bias 電壓 V를 加하면 그 電壓의 大部分은 表面의 空間電荷層에 걸려서 그 層에 W를 加해진 電壓 V의 平方根에 比例하여 더 增加한다.

이와같은 空間電荷層에 荷電入射粒子가 들어오면 既

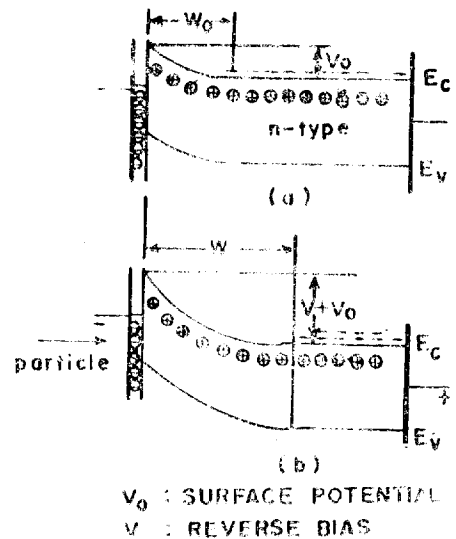


그림 2. 表面障壁型

한 補洩 電流의 電子, 正孔 雙을 만들어 各各 兩電極에 捕電되어서 放射線의 세기에 比例하는 pulse output을 낸다.

本 檢出器의 特徵는 junction 部分의 最少限度의 簡單한 裝置로서 工作하며 加熱을 必要로 하지 않으므로 lower carrier life time의 改善이 可能하여서 各方面에서 널리 利用되고 있다. 한 便 欠點으로서 空間電荷領域이 接連하는 $p-n$ 接合型에 比하여 작다는 것이다. 現在까지 얻어진 最大의 有效面積은 $5 cm^2$ 까지의 것이 있으나 depletion layer의 增加없이는 input capacity가 增加하기 때문에 出力 S/N를 惡化하므로 有效面積의 크기에도 限度가 있다.

나) $p-n$ 接合型

p type의 Si 表面에 濃도가 높은 n type 不純物의 層은

層은 인공의 위하여 Pb를 熱擴散시키면 0.1에서 1 μ 의 길이까지 penetrated이서 그림 3의(a)와 같이 n型領域의 電子는 電子濃도가 낮은 p型領域으로 擴散에 依하여 移動하여도 Donor原子는 結晶內을 움직일 수 있으므로 電氣的 中性이 保이져서 n型領域에는 正의 空間電荷가 남고 反對로 p型 領域에는 負의 空間電荷가 남아서 熱平衡時에 n과 p의 兩領域 Fermi準位가 一致인때에 均衡이 保이므로 더 以上の 電子, 正孔의 移動을 妨害하지 電氣的 中重層으로 0 bias에서 V_0 라는 電位差가 生한다. 여기에 그림 3(b)와같이 逆方向 bias V를 外部로부터 加하면 不純物原子 ion의 空間電荷層은 더 厚게 된다. 이의 空間電荷層에는 電氣 carrier의 電子 및 正孔의 빠져 있으므로 다음 部分에 比較하여 電氣抵抗이 少고 外部로부터 加해진 電壓은 弱은 空間電荷層에 對한 結果로 이 部分에만 強한 電界가 生겨서 表面障壁型과 같이 入射荷電粒子에 依한 電離作用으로 生한 電子, 正孔雙을 兩電極에 빠른 速度로 捕電한다.

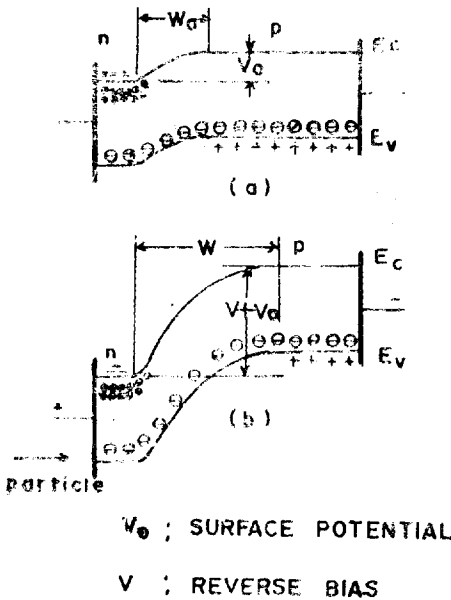


그림 3. p-n 接合型

이 때 接合面 兩側의 電荷量은 同으므로 negative acceptor의 density는 positive donor의 density 보다 될면 必야함으로 空間電荷層의 두께는 거의 p型領域에 限存한다는 것을 알 수 있다. 이러한 空間電荷의 두께 W는 n型 領域의 空間電荷層을 無視하면

$$W = \sqrt{\frac{\epsilon(V_0 + V)}{12\pi e N_a}} \quad (1)$$

但 ϵ : 結晶의 誘電率

N_a : Net acceptor 數

$$N_a = \frac{1}{e \mu_p \rho_p} \quad (2)$$

但 μ_p : p type silicon의 mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)

ρ_p : p type silicon의 resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)에서

$$W = \sqrt{\rho_p V} / 3 (\mu) \quad (3)$$

으로 된다.

한편 detector의 電氣容量 C_d 는 接合面積을 A 라하면

$$C_d = \frac{\epsilon A}{4\pi W} = \frac{3 \cdot e A}{4\pi \sqrt{\rho_p V}} \quad (4)$$

가 됨으로 誘起電壓 V_{ind} 는

$$V_{ind} = \eta \cdot Q / C_d + C_s \quad (5)$$

但 η : charge carrier의 collection efficiency

Q : incident charged particle에서 生한 electron charge의 總量.

C_s : 外部回路의 stray capacity

가 된다. 따라서 V_{ind} 를 크게 하려면 W를 크게 하기 위하여 V를 크게 할 수 있도록 N_a 를 적게 하여야 한다. 現在까지 base resistivity가 Si에서 $10^5 \Omega\text{cm}$, Ge에서 $40 \Omega\text{cm}$ 가 얻어지고 있으나 intrinsic의 狀態까지는 10,000倍 以上이 더 必要하다. 한便 W는 數 mm의 크기를 얻을 수 있게 되었으나 더 큰 것을 얻기 위하여 다음과 같은 p-i-n型이 生겼다.

다) p-i-n型

高純度의 Si材質과 加工技術으로서 (3)式과 같이 數 mm 以上の 空間電荷層의 두께를 얻을 수 없다. 이것으로서 ion化能이 낮은 proton이나 電子, γ 線에 對해서 充分한 두께가 못된다. 여기서 더 두꺼운 것을 얻기 위하여 普通 p-n接合面에 眞性領域(Intrinsic)을 만들 수 있으면 된다.

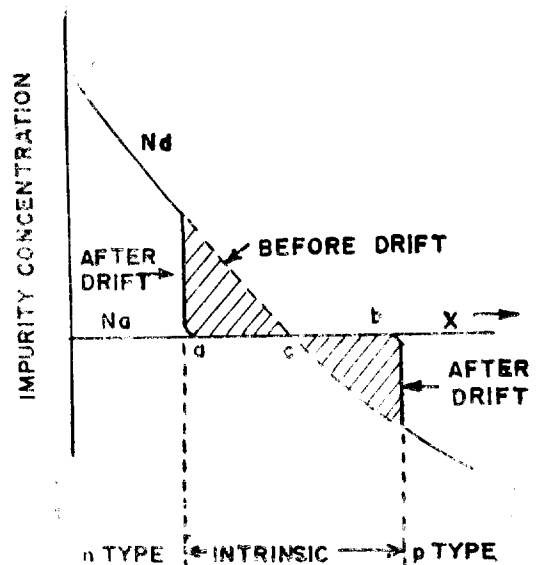


그림 4. p-i-n 接合型

p 型 Si block의 一面에서 donor 불純物인 Li ion을 接合素子에 逆 bias를 加한채로 150°C에서 短時間 加熱하면, 電場에 끌려서 Li⁺이 p 型 領域에 drift한다. Li⁺이 drift한 分만큼 p 領域의 acceptor와 補償함으로 그림 4와 같은 n 領域의 N_a 의 減少分과 均衡이 잡히는데까지 처음 있었던 接合部位 c에서 眞性領域이 a, b間에 擴大된다. 이 때 結晶의 容量을 Li⁺ drift시켜 72時間後 測定한 値와 drift前의 値를 比較한 것이 그림 5이다.

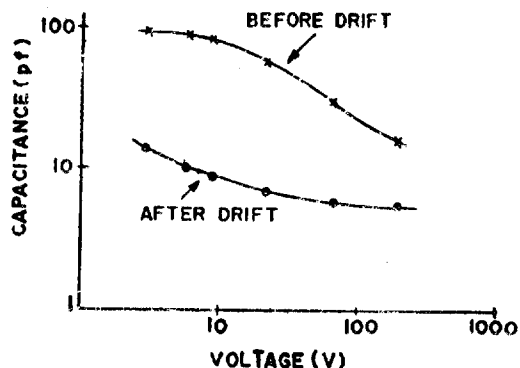


그림 5. $p-i-n$ 接合型의 容量特性

이와같이 함으로써 將次 空間電荷層의 두께를 1cm까지도 할 수 있게 된 것이다. 따라서 100Mev 以上の α 粒子나 電子, γ 線까지도 檢出할 수 있는 充分한 두께를 얻을 수 있다. 그러나 여기서는 $N_i = N_a - N_d$ 으로 얼마든지 큰 N_d , N_a 에서도 작은 $N_i \rightarrow 0$ 를 얻을 수 있게 보이거나 donor, acceptor를 많이 넣으면 그만큼 trap, recombination이 甚하게 됨으로 N_d , N_a 도 처음부터 可及的 적어야 한다.

4. 檢出器의 Diode 特性

檢出器素子は 整流器素子와 構造의 由로 같다. 그러나 그 接合面이 階段狀이고 性能上 逆電流特性의 嚴格히 要求되는 點이 다르다.

가) 漏洩逆電流特性

檢出器素子에 漏洩逆電流가 그림 1(a)의 並列負荷抵抗 R 을 通해서 흐르고 있으면 이것은 增幅器入力에 雜音信號로서 發生함으로 마침 電子管의 格子電流에 依한 雜音과 類似하다. 따라서 檢出器로서 使用時에는 $1\mu A$ 以下로 抑制되지 않으면 좋은 分解能을 얻기 困難하다.

漏洩逆電流特性의 一例을 圖示한 것이 그림 6이다. 이러한 것을 理論적으로 取扱할 것으로서 p 型 Si에 對해서 室溫에서의 漏洩電流 $I_L(A/cm^2)$ 는

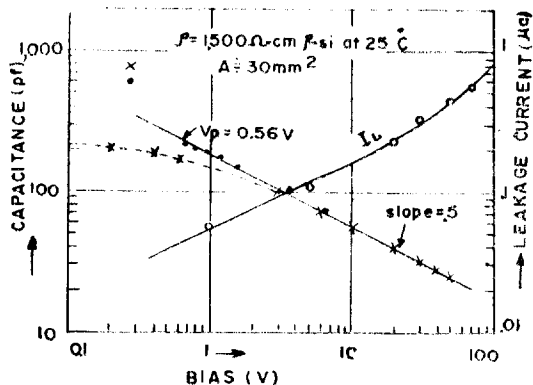


그림 6. Si 檢出器의 diode 逆特性

$$I_L = 1.7 \times 10^{-14} \rho / \sqrt{\tau} + 3.8 \times 10^{-14} V \sqrt{\rho V} / \tau \dots (6)$$

但 τ : minority carrier life time

과 같다. 여기서 (6)式的 第1項은 擴散電流이며 第2項은 空間電荷層에서의 carrier 發生電流로서 後者が 數值的으로는 크다.¹⁰⁾

여기서 I_L 은 大體로 carrier life time τ 에 反比例한 것으로 처음부터 τ 를 크게 하여서 數 100 μs 程度의 것을 얻기 위한 材質과 加工技術이 必要하다. 그러나 接合型을 만들기 위한 高溫擴散의 欠點은 바로 그 物質의 life time을 減少시키고 있다는 點이다.

나) 電氣容量特性

檢出器素子の 電氣容量과 逆 bias 電壓과의 關係를 實測値로서 圖示한 것이 그림 6이다. 式(4)에서 豫想할 수 있는 바와 같이 容量 $C(A/V)$ 에 反比例한다. 그러나 bias가 낮은 側에서는 實測値(x)가 理論値(o)보다 작아지나 接合部의 自發電壓 $V_0 = 0.56V$ 로 補正하여 주면 正確히 그 傾斜가 -0.5의 直線이 된다.

이와같이 檢出器素子の 電氣容量은 逆 Bias 電壓에 따라서 變化함으로 動作 bias 點에 關係없이 入射荷電粒子의 energy에만 比例하는 增幅器出力을 얻으려면 charge sensitive amplifier를 前置增幅器로서 使用하여야만 된다.¹⁰⁾

5. 放射線의 檢出特性과 實測例

半導體를 쓴 放射線檢出器의 本質的인 特徵은 첫째로 energy 分解能이 좋고 response가 빠르다는 點이다. 이 以外로 出力의 energy 比例性이 좋으며, energy

level에 따라 공간電荷層의 두께도 변화시킬 수 있다. 또 副次的으로 塵埃 또는 雜物質에 依한 損失의 欠의 없고, 少電, 堅牢하며 高電壓의 必要없다.

여기서는 本質的인 前2者에 關해서 一 個別的으로 考察해 보기로 하고 이 以外의 欠陷으로서 溫度影響과 radiation damage에 關해서도 實測例로서 檢討해 보기로 한다.

가) 分解能:

Energy 分解能의 다른 檢出器에 比해 좋은 理由는 첫째로 信號即 charge carrier 을 兩 개 發生하는데 必要한 energy 가 3.5 eV로서 작다는 것이다. 勿論 一般的으로 檢出器의 energy 分解能은 이 以外에 detector 固有의 雜音, detector 內에서의 radiation 의 energy loss straggling, 增幅器回路의 雜音 其他 特性等에 依存하나 原理的으로 除去 不可能한 carrier 數의 統計的 偏差에 依한 部分만을 比較해 보면 다음 表 2와 같다.

Detectors	energy/ carrier	Carrier數 (Mev)	統計的偏差
NaI	700ev	1,400	2.7%
Gas	27//	37,000	0.6%
Si	3.5//	290,000	0.18%

表 2. 各種檢出器比較

여기서 實測例로서 $C_m=20$ PF일 때 FWHM (Full Wave at Half Maximum)에서 6 KeV를 얻고 있다.

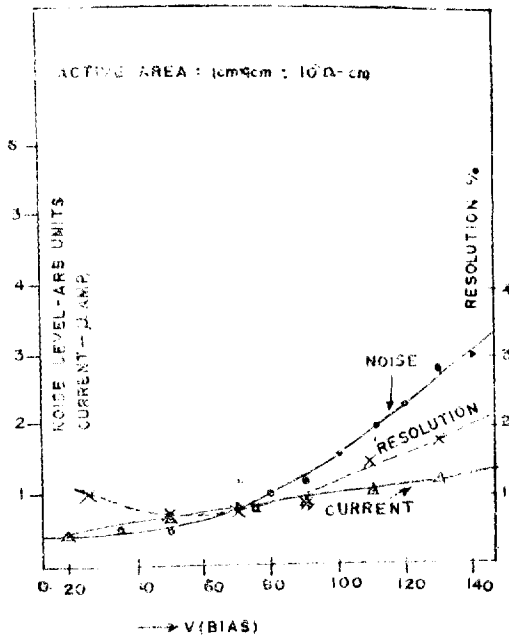


그림 7. Bias에 對한 分解能과 雜音特性

또 Si의 分解能과 雜音이 bias變化에 따라서 어떻게 變化하는가를 나타내고 있는 것이 그림 7이다.

나) Rise Time.

Charge carrier의 transit time t_{tr} :

$$t_{tr} = \frac{X}{V} = \frac{X}{\mu E} \dots \dots \dots (7)$$

이것을 gas의 比較하면

$$t_{tr} / t_{tr} = 10^{-3} \dots \dots \dots (8)$$

程度가 작다.

實際에 있어서는 素子內의 空間電荷層의 直列抵抗 R_b 의 素子容量 C_d 및 入力回路容量 C_m 외의 合成容量 C 로에 對해 지는 時定數 $R_b C$ 가 支配的으로 되어 實測值에서 數 10 μs 가 얻어지고 있다.

다) 溫度特性

Si接合型檢出器의 溫度에 對한 分解能의 變化狀態를 나타낸 것이 그림 8이다.

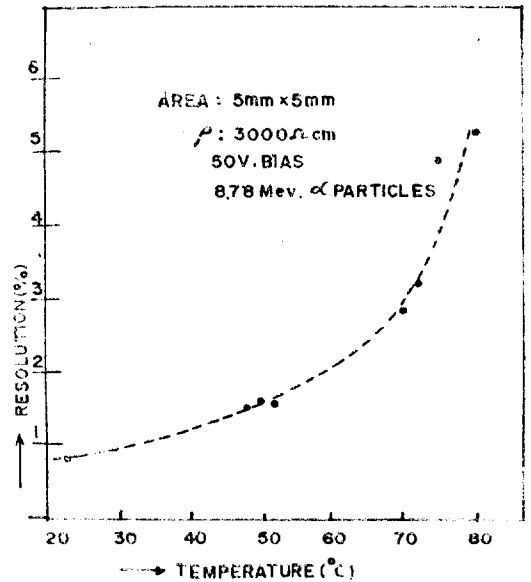


그림 8. 分解能의 溫度特性

여기서 溫度 上昇에 따라 分解能이 나빠지는 것은 그림 9와같이 雜音電流 I가 커지는 것에서 알 수 있으나 이것을 $-72^\circ C$ 에서 보면 거의 變化가 없다. 그 때의 雜音電流는 bias電壓의 變化에 對해서도 低溫에서는 別로 變化하지 않는다.

에서 damage를 받는다는 報告가 있다. 中性子에 對해서 10^{13} nvt 照射를 받은 前後의 檢出器狀態를 P_{210} 의 α 를 測定한 結果가 그림 10에 圖示되어 있다. pulse의 높이와 폭이 작고 雜音이 極端的으로 많아졌음을 알 수 있다. 그것은 그림 11에의 整流特性上에서도 알 수 있다.

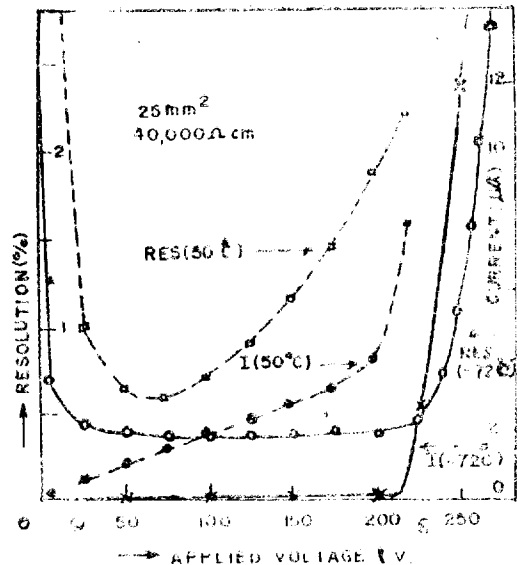


그림 9. 分解能 및 雜音電流의 溫度特性和 bias 電壓의 關係

라) Radiation Damage.

半導體檢出器는 構造上 radiation damage을 받기 쉬운 缺點을 갖고 있다. α 線(P_{210})에 對해하여 10^{13} 程度

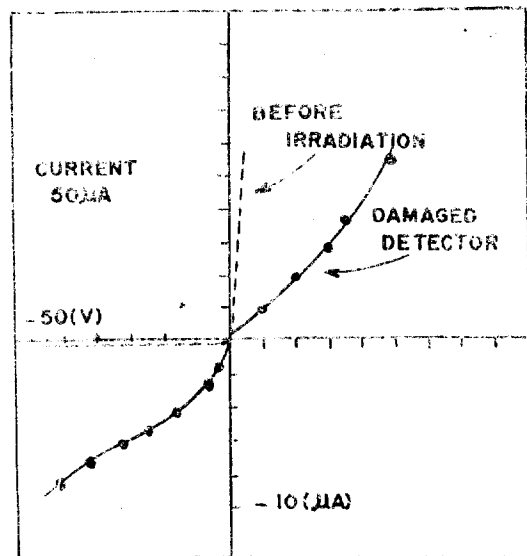


그림 11. Radiation damage에 의한 整流特性

參考文獻

- 1) K.G. McKay; "A Ge Counters" *Phy. Rev.* Vol. 96. p 1537~38. Nov. 1949.
- 2) J.W. Mayer & B. Gossick; "Use of Au-Ge Broad Area Barriers as Alpha particle Spectrometers." *Rev. Sci. Instr.* Vol. 27. P 407~8. Jun. 1956.
- 3) J.M. McKenzie & D.A. Bromley; "Observation of Charged Particle Reaction Products." *Phy. Rev.* Vol. 2 P. 303~305. Apr. 1959.
- 4) W. Shockley; "International Comperence on Semiconductors" *Physics*. Prague. 1960.
- 5) *Proc. I.R.E. Transaction NS 7 No. 2~3.* 1960.
- 6) *Proc. I.R.E. Transaction NS 8 No. 1.* 1961.
- 7) *Proc. I.R.E. Transaction NS 9 No. 3.* 1962.
- 8) C. G. Clayton & J.B. Whittaker; "Bulk Photo Conductivity Detectors Suitable for Gamma Radiation." *Nucleonics*. Vol. 21. No.4. Apr. 1963.
- 9) C.T. Sah, R.N. Noyce & W. Shockley; "Carrier Generation and Recombination in P N Junctions and P N Junction Characteristics" *IRE*. Vol 45. p 1228 Sep. 1957.
- 10) 鄭萬永·金應鎮; "Transistor에 依從 Low Noise Charge Sensitive Amplifier 本會誌. 제 11 권. 論文資料. (1963年 7月 25日 接受)

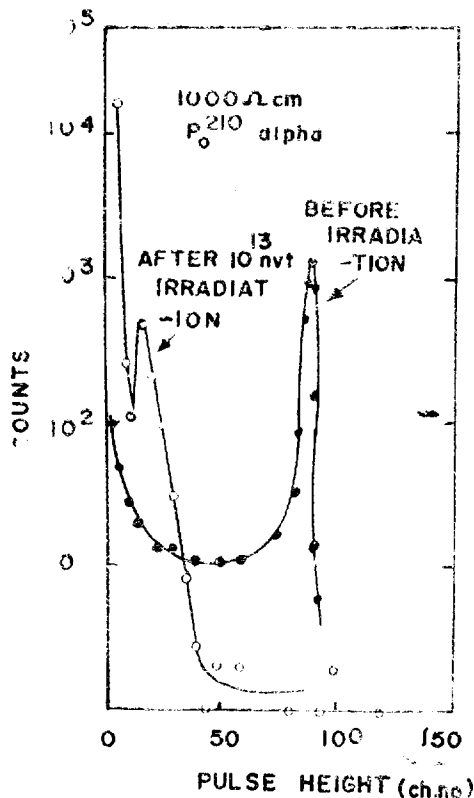


그림 10. Radiation damage에 의한 analyzer 特性