

Silicon P-N Junction Diode 에 의한 X-Ray 및 Gamma-Ray 의 Dose Rate 測定

(Measurements of X-Ray and Gamma Ray
Dose Rate by the Silicon P-N Junction Diode)

鄭 萬 永* · 金 惠 鎮**

(Chung Man Yung · Kim Duck Jin)

ABSTRACT

The measurements of X-ray and Gamma-ray Dose Rate have been successfully made by measuring the short circuit current of the Silicon P-N Junction Diode being irradiated.

The short circuit current flows when a silicon P-N Junction Diode is irradiated by X-ray or Gamma-ray radiations due to photovoltaic effect. A brief analysis is given in order to verify the proportionality of a short circuit current to the Dose Rate. Using this method, measurements of X-ray Dose Rate were carried out in the range of 0.05-1600 r/m successfully. The calibration was made by comparing with Victoreen condenser r-meter.

Some advantages in this Dose Rate meter over a condenser r-meter were found.

One can measure a continuous variation of X-ray Dose Rate with this rate meter at the control console of X-ray device.

概 要

Silicon P-N Junction Diode 에 있어서 短波長의 電磁波 energy 를 吸收할 때 photovoltaic effect 가 發生하는 現象을 利用하면 X-ray 나 γ -ray 의 Dose Rate 를 測定할 수 있다. Silicon semiconductor 內에 侵入한 X-ray 또는 γ -ray 의 energy 는 이것과 半導體間의 相互作用에 依하여 energy 를 잃게 되며 잃은 energy 에 比例하는 自由電子와 正孔對의 發生을 가져오게 된다. 이

와 같은 對發生率(pair production)은 半導體內에 들어간 photon 의 數에 比例하므로, 發生된 自由電子의 移動에 依한 short circuit current 를 測定하므로써 結局 Dose Rate 를 알게 된다. 지금까지의 實驗 結果에 依하면 0.05 r/m~1600 r/m 의 範圍에 있어서 X-ray Dose Rate 를 거의 直線의 으로 測定할 수 있었다. X-ray 의 Dose Rate 測定値는 condenser type r-meter 에 依하여 calibration 하였고 이 方法에 依한 測定値와 r-meter 에 依한 測定値와는 完全한 一致를 볼 수 있었다. 이 short circuit current 는 electron hole pair 의 發生率에 比例하기 때문에 timer 를 쓰지 않아도 照射時間에 關係없이 直接 Dose Rate 를 測定할 수 있는 利點이 있을 뿐만 아니라 condenser type r-meter 와 같이 charge-discharge 를 反復하고 X-ray 照射를 shut down 하고서야 electrometer 로 읽는 不便이 없이 直接 X-ray control console 에서 Dose Rate 를 連續의 으로 直讀할 수 있으므로 管球 電壓이나 電流를 rate meter 를 보면서 調節할 수 있다. 이의 應用은 여러가지를 들 수 있지만 X-ray 나 γ -ray 의 isodose curve 를 直接 測定할 때에는 크기가 작은 點에서 特히 實用性이 크다고 생각 한다.

1. 序 論

Silicon P-N Junction Diode 를 利用하여 放射線을 測定하려는 努力은 일찌기 1959 年代부터 始作 되어 오늘 날까지 繼續 되어 왔다. 그 보다 훨씬 앞서서 이미 Germanium P-N Junction 의 이 方向에의 使用 可能性이 研究 되어 왔었으나 이의 固有한 溫度 特性 때문에 더 發展을 보지 못하고 溫度 特性이 比較的 安定된 silicon single crystal 이 登場하게 되었고 오늘 날에 이르러서는 α , β , proton, neutron 等の 微粒子나 γ -ray 等の energy spectroscopy 에 널리 利用 되기에 이르렀다. 特히 α -particle 이나 proton 의 energy spectrum 의 測定에 있어서는 從來의 어떠한 檢出器로서도

* ** 原子力研究所 電子工學研究室
Electronics Division
Atomic Energy Research Institute

따라 올 수 없는 優秀한 分解能 特性을 가지고 있어 이 方面에의 研究에 있어서는 없어서는 안 될 檢出器가 되었다.

그러나 pulse 計數方式을 使用하지 않으면 안되는 이와같은 應用에 있어서 檢出器 自體는 勿論 附屬 電子計數 回路의 速度에는 限界가 있으므로 Dose Rate가 數 roentgen/minute 以上으로 커지면 個個의 pulse를 計數할수 없게 된다. 例컨대 1 curie의 radioisotope로부터는 3.7×10^{10} counts/sec (4π counter의 경우)의 放射線이 나오므로 지금까지의 電子計數技術로서는 겨우 10^6 counts/sec 程度 밖에 計數하지 못하므로 100 μ c 程度의 Dose Rate 밖에 測定할수 없다. 그러나 治療用 Cs¹³⁷과 같은 것은 普通 數 1,000 curie 程度의 activity를 가지고 있으므로 이로부터 나오는 放射線의 Dose Rate를 測定할때는 다른 方法을 講究하지 않으면 안된다. 이러한 目的에 利用하기 위해서 今般 當 研究室에서는 Silicon P-N Junction Type Dose Rate Meter를 研究 開發 하였다.

이 Dose Rate Meter를 在來의 condenser-type r-meter와 比較하여 그 長點을 列擧하면 다음과 같다.

- 1) 檢出器는 普通 transistor 만한 크기이므로 大端히 작아서 X-ray 나 γ -ray의 isodose curve 등을 測定할때 分解能이 좋은 結果를 얻을 수 있다.
- 2) 檢出器에는 如何한 電源도 供給해줄 必要가 없으며 檢出器 自身이 電源의 役割을 한다.
- 3) 檢出器와 指示計인 DC micro-ammeter 사이에는 直流의으로 連結이 되어 있어서 이 사이의 距離를 數 10m나 떨어져서 할수 있으므로 X-ray 나 γ -ray 照射中에도 떨어져 安善한 測定을 할 수 있을 뿐만 아니라 途中의 電線에 依한 影響이 없다.
- 4) 檢出器의 sensitive region은 完全히 密閉된 金屬 case 內에 들어 있기 때문에 濕度에 依한 影響이 거의 없다.
- 5) 溫度에 依한 影響은 極히 規則的이어서 周圍溫度를 알면 正確히 補正할 수 있다.
- 6) 檢出器는 小型 堅固하기 때문에 取扱에 便利하고 安價하게 製作할 수 있다.

大體 以上과 같은 利點들이 있어 實用 價値가 크다고 생각된다.

2. P-N Junction Diode에서의 Short Circuit Current

Silicon 單結晶 半導體內에 만든 P-N Junction에는 charge carrier가 普通 때는 存在하지 않기 때문에 이

를 depletion-layer (空間電荷層)라고도 부른다. 여기에 外部로부터 γ -ray 나 X-ray 와 같은 photon 이 들어 오면 半導體 物質과의 相互作用으로 photon 은 進行함에 따라 漸次的으로 energy를 잃으며 完全히 energy를 잃으면 이 photon 은 半導體內에서 捕獲된 것으로 생각 될 수 있다. 反面에 半導體 原子의 valence band에 束縛 되어 있던 電子는 이 photon으로부터 energy를 受取하여 band gap을 넘어 conduction band에 들어가게 되며 結果적으로 電氣적으로 中性이던 P-N Junction region에는 電界에 依하여 自由로 移動할 수 있는 電子와 正孔의 對(pair)가 발생하게 된다. 1個의 electron-hole pair를 발생 시키는데 要하는 平均 energy는 Si 半導體의 경우 約 3.6 eV이다. 이것은 空氣의 電離에 必要한 energy의 約 10분의 1밖에 안된다. 이 energy를 ϵ (=3.6 eV)이라 하고, 半導體에 入射하는 1 photon이 가지고 있는 本來의 平均 energy를 E_0 라고 하면 이 photon이 完全히 半導體內에서 完全 阻止 當했을 때에 발생한 electron-hole pair의 數 P_0 는

$$P_0 = \frac{E_0}{\epsilon} \quad (1)$$

이며 N 個의 photon이 捕獲될 때 발생되는 總 pair 數 P 는

$$P = N \frac{E_0}{\epsilon} \quad (2)$$

로 表示 된다. 實際로 pair 발생은 P-N Junction 內에서도 일어 나고 半導體內의 다른 部分에서도 일어나는데 photon이 停止되는 點(range) 附近에서 가장 많이 발생한다.

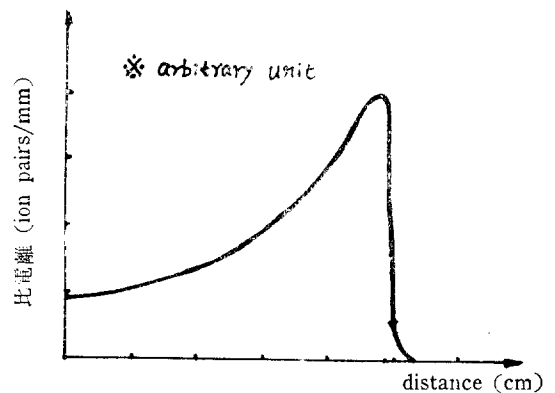


그림 1. 比電離와 距離와의 關係
(Fig. 1 Specific ionization vs. distance)

이 關係는 Bragg curve로서 그림 1과 같이 나타내어지고 있다. 그러므로 photon이 될수 있는 대로 P-N Junction 內에서 停止하도록 만드는 것이 가장 理想的이

겠으나 이部分 밖에 생긴 pair 들도 diffusion length 가 발생 距離보다 充分히 길면 junction 까지 擴散되어 들어 오므로 같이 測定될 수 있다.

普通 半導體 檢出器를 使用하여 energy spectrum 을 測定 한다면 지 할 경우에는 pulse 計數를 하여야 하므로 rise time 이 빠른 pulse 를 얻기 爲하여 P-N Junction 에 逆 bias 電壓을 걸어 주어야 한다. 이 逆 bias 를 크게 할수록 이 電壓의 平方根에 比例하여 P-N Junction 의 幅이 넓어져서 좋긴 하지만 이 逆電壓으로 인한 leakage current 는 signal pulse output 의 S/N 比를 나쁘게 하고 檢出器의 energy resolution 을 制限하는 커다란 要素가 되고 있다. 그러나 Dose Rate Meter 로서 使用할 경우에는 直流 電流를 測定하는 것이므로 P-N Junction 內에 carrier 의 diffusion 에 依하여 自然의 內部 電界에 依해서만 charge carrier 를 collect 해도 電流計의 反應速度는 充分히 빠르다. P-N Junction 의 內部電界를 그림 2에 圖示했다.

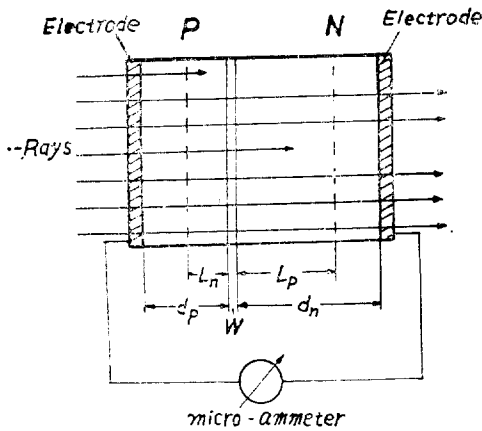


그림 2. P-N Junction 의 內部電界

(外部에서 bias 電壓을 印加하지 않았을때)

(Fig. 2 Built-in electric field of P-N Junction)

이와 같이 逆 bias 를 걸어 주지 않으므로 leakage current 가 홀름 念慮가 전혀 없으므로 微小範圍의 Dose Rate 도 測定이 容易함을 알 수 있다. 外部에서 들어온 放射線에 依하여 발생된 electron-hole pair 들은 P-N junction 의 內部電界에 依하여 hole 과 electron 은 各各 反對 方向으로 끌려 가게 되는 것이며, 이 junction 以外의 部分의 傳導度는 junction 에 比하여 大端히 크므로 結局 半導體의 P-type 과 N-type 兩端에는 起電力이 생기게 되고 이 兩極間에 micro-ammeter 를 接續시키면 P-type 에서 N-type 쪽으로 電流가 흐른다. 이것이 Dose Rate 에 比例하는 short circuit current 인데 다음 節에서 이에 對

한 分析을 해 본다.

3. Dose Rate 와 Short Circuit Current 와의 關係

그림 3 과 같은 P-N Junction 에 있어서 X-ray 나 γ -

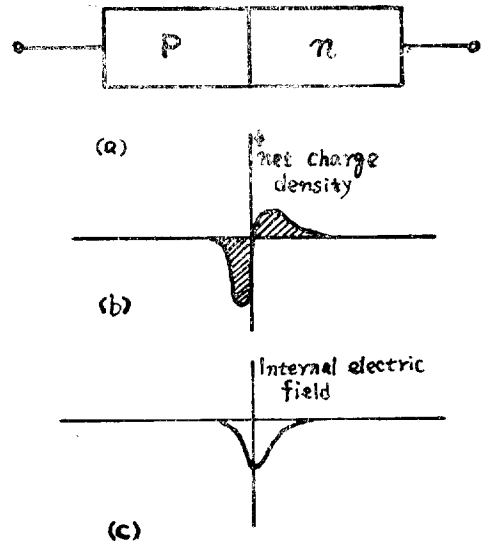


그림 3. P-N Junction 의 構造

(Fig. 3 Structure of P-N Junction)

ray 와 같은 短波長의 電磁波가 照射될 경우에 일어나는 photovoltaic effect 에 關해서는 一般的인 解析이 되어진 바 있으므로 여기서는 Cumberow⁽¹⁾의 理論 가운데에서 Dose Rate 測定에 關聯된 部分만을 引用하여 short circuit current 에 依한 Dose 의 測定이 理論上으로 妥當性이 있음을 證明 하려고 한다. 먼저 使用될 記號는 다음과 같다.

W : Depletion layer (P-N Junction)의 幅

d_n, d_p : Ohmic contact 된 電極으로부터 junction 까지의 距離

L_n, L_p : P-region 과 N-region 에 있어서의 電子와 正孔의 diffusion length

$g(N)$: 入射한 photon 數의 函數로 表示된 電子-正孔 對의 發生率(generation rate)

N : 檢出器에 入射한 photon 의 數

e : 電子의 荷電 (1.6×10^{-19} Coulomb)

i_s : Short circuit current density

Cumberow 에 依하면 diffusion length 가 depletion layer 의 幅 W 보다 充分히 클 때에는 單位 面積當 照

르는 short circuit current 의 크기는 式(3)과 같이 表示된다.

$$i_s = e \cdot g(N)(L_1 + L_2) \quad (\text{amp/cm}^2) \quad (3)$$

여기서 $L_1 = \alpha_1 L_n$, $L_2 = \alpha_2 L_p$ α_1 은 $\frac{d_p}{L_n}$ 의 函數이고, α_2 는 $\frac{d_n}{L_p}$ 의 函數이다.

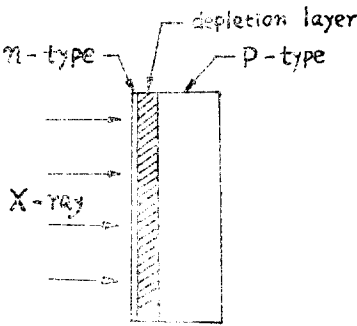


그림 4. 한쪽 表面에 接近 시킨 P-N Junction
(Fig. 4 P-N Junction near the irradiated surface)

effect 라고 알려져 있음)을 없애고 P-N Junction 內에서만 photon 이 가진 全 energy 를 잃어 버리도록 하기 爲해서 P-N Junction 을 入射面에 數 micron 程度까지 接近 시켜서 만든다. Surface barrier type diode 같은 것은 이의 좋은 例라고 볼수 있다. P-N Junction Diode 의 경우에도 P-type 이나 N-type 半導體 表面에 反對의 極性을 갖는 impurity 를 數 micron 以內로 擴散 시켜 만들 수 있다. 이와 같이 만든 P-N Junction 의 모양을 그림 4 에 例示하고 있다. 이 때에는 junction 까지의 길이와 diffusion length 사이에는 $d_p \ll L_n$, $d_n \ll L_p$ 의 條件을 滿足 시키므로 式(3)의 short circuit current 는 簡單히 다음 式으로 表示된다.

$$i_s = e \cdot g(N)L_p \quad (\text{amp/cm}^2) \quad (4)$$

Depletion layer 의 幅이 diffusion length 에 比하여 無視할 수 없을 때에는 式(4)에 이를 添加하면 式(5)와 같이 된다.

$$i_s = e \cdot g(N)(L_p + W) \quad (\text{amp/cm}^2) \quad (5)$$

式(5)에서 보는 바와 같이 電子의 charge e 나 hole 의 diffusion length L_p , P-N Junction 의 幅 W 등은 diode 가 一로 만들어 지면 變할수 없는 常數가 되므로 다만 Dose Rate 에 依한 electron hole pair 의 generation rate 인 $g(N)$ 에만 比例하는 것을 알수 있다. 그러던 이던 energy 를 갖는 X-ray 나 γ -ray 를 半導體에 照射할때 electron-hole pair 의 發生率이 어떻게 變하는 가를 다음에 考察해 보기로 한다.

實際의 隔壁用 X-ray 의 energy 範圍는 400 kev 以下이므로 半導體內에 設치 入한 경우 入射面에서 P-N Junction 까지의 길이와 數 마이크로미터 程度의 減衰를 當하고 예로는 完全 阻止 當하기도 한다. 이러한 現象(window

4. Electron-hole Pair 의 Generation Rate

X-ray (또는 γ -ray)가 物質內를 通過할때 吸收되는 現象은 進行 距離에 對하여 指數 函數의인 關係를 가지고 있다. 均一한 媒質表面에 $N(0)$ 個의 photon 이 入射하여 距離 x 만큼 進行 했을때의 photon 의 남은 數 $N(x)$ 는 아래와 같이 表示 된다.

$$N(x) = N(0)e^{-Kx} \quad (6)$$

여기서 K 는 全吸收係數(total absorption coefficient)이다.

X-ray 또는 γ -ray 는 物質內를 通過할 때 物質과의 相互作用을 일으키는데 그 中 重要한 것은 photoelectric effect, compton effect 및 pair production 의 3作用이라고 할 수 있다. 그러므로 photon 이 가지고 있던 energy 는 이와 같은 作用을 하는 데에 消耗 되는 것이나 完全 消耗 되었을 때 이 photon 은 停止 當할 것으로 생각할 수 있다. 그러므로 式(6)에서 total absorption coefficient K 는 實際로는 photoelectric effect 에 依한 absorption coefficient K_{ph} , compton effect 에 依한 absorption coefficient K_c 및 pair production 에 依한 absorption coefficient K_p 의 代數和로서 다음과 같이 表示 된다⁽³⁾.

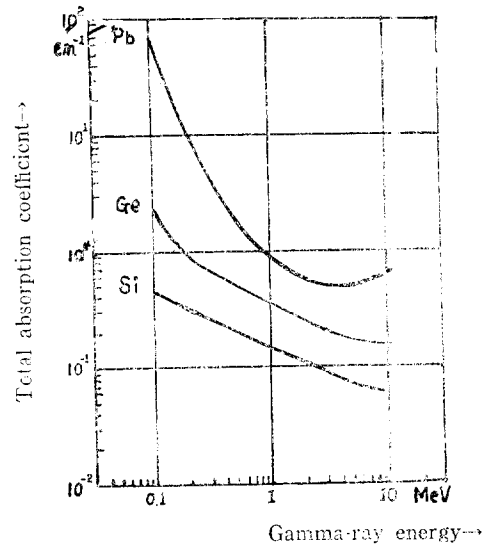


그림 5. Gamma-ray 의 total absorption coefficient 와 energy 의 關係
(Fig. 5 Total absorption coefficient of Gamma-ray as a function of the energy)

$$K = K_{ph} + K_c + K_p \quad (7)$$

이들 absorption coefficient 들은 物質의 種類와 γ -ray (또는 X-ray)의 energy 에 따라 그림 5 와 같이 變化한다⁽²⁾⁽⁴⁾. 여기에는 silicon single crystal 과 함께 germanium single crystal 과 鉛(P_b)을 包含 시켜 比較하였다. X-ray 나 1 Mev 以下の γ -ray 에 依해서는 pair production (electron-positron)은 일어 나지 않으므로 이 때에는 K_p 는 考慮하지 않아도 된다. Cs^{137} 이나, Co^{60} 와 같은 energy 範圍의 γ -ray 는 S_i 半導體內에서의 作用은 주로 compton effect 임으로 K 만이 問題되고 다른 것은 無視된다. Co^{60} , Cs^{137} 의 γ -ray 나 X-ray 의 energy 吸收가 주로 compton effect 와 photoelectric effect 에 依한다고 본다면 hole-electron pair 의 generation rate 는 아래와 같이 求할수 있다. 卽 P-N Junction 內부와 junction 의 兩境界面에서 hole 및 electron 의 diffusion length L_p 및 L_n 의 距離內에 發生한 hole-electron pair 에 依해서만 外部의 short circuit current 가 決定된다고 하면 單位時間內에 이部分內에서 發生되는 hole-electron 의 pair 數는 compton electron 또는 photo-electron 의 數와 이들이 平均적으로 發生 시키는 hole-electron 의 pair 數와의 相乘積으로 表示할수 있다. 그리므로 半導體의 表面에 單位時間當 $N(0)$ 個의 photon 이 入射하고 있다면 hole-electron 의 generation rate $g(N)$ 은

$$g(N) = K \cdot \frac{E}{\epsilon} N(0) \quad (8)$$

여기서 E 는 compton electron 이나 photo-electron 의 平均 energy 이다. 이 式을 利用하면 式 (5)는

$$i_s = e \cdot (L_p + W) \cdot K \cdot \frac{E}{\epsilon} N(0) \quad (9)$$

式 (9)에서 이미 만들어진 P-N Junction 일 경우 e , L_p , W , K , ϵ 들은 모두 常數임으로 電流에 影響을 주는 因子는 energy E 와 photon 數 $N(0)$ 이다. 式 (9)를 簡單히 하면

$$i_s = m EN(0) \quad (10)$$

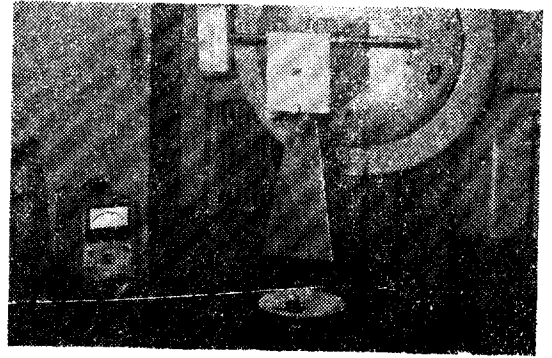
와 같이 쓸수 있다. 여기서 m 은 常數로서 아래와 같다.

$$m = e \cdot (L_p + W) K \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (11)$$

式(10)을 보면 short circuit current i_s 는 energy 와 單位時間當 入射하는 photon 의 數의 兩數임으로 photon 의 energy 를 알면 結局 單位 時間當 入射하는 photon 數만의 兩數가 되어 short circuit current 가 單位 時間當 入射하는 photon 의 數 다시 말하면 Dose Rate 에 比例한다는 結論을 얻을 수 있다.

5. 實驗 結果

本 實驗에 使用한 Silicon P-N Junction Diode 는 resistivity 10,000 ohm-cm 인 P-type silicon single crystal 의 한 쪽 表面에 donor impurity 인 磷(P)을 0.2 micron diffusion 시킨 것과 4.0 micron diffusion 시켜서 n-type 層을 만든 2 個의 diodes 를 使用하였다.



寫眞 (1) X-ray Dose Rate 의 實測光景
(Experimental set up for X-ray Dose Rate measurement)

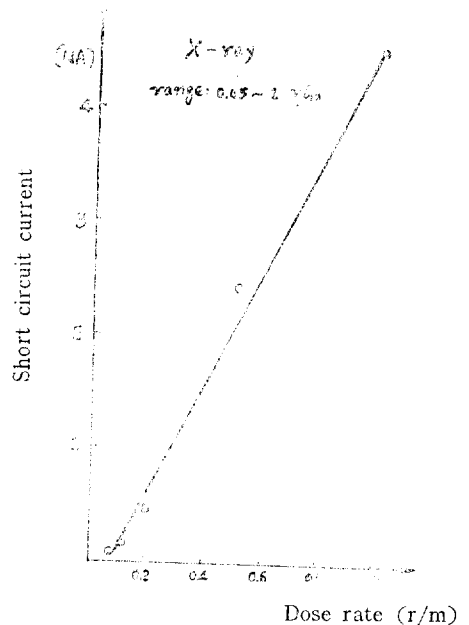


그림 6. 0.05~1.0 r/m 範圍에서의 Dose Rate 와 short circuit current 와의 關係
(Fig. 6 Dose Rate vs. short circuit current in the range of 0.05~1.0 r/m)

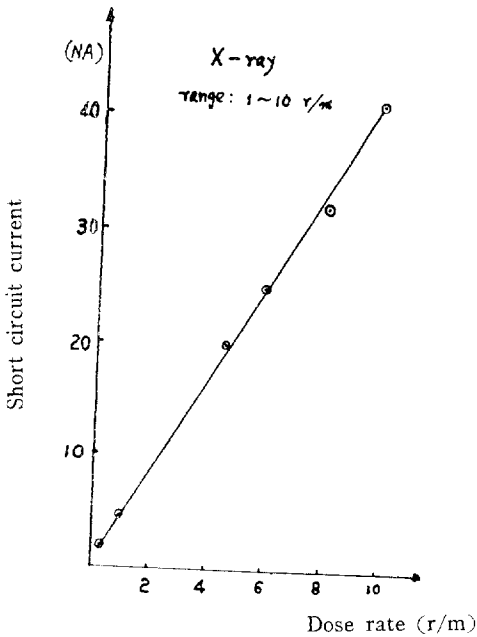


그림 7. 1~10 r/m 範圍에 있어서의 Dose Rate 와 short circuit current 와의 關係
(Fig. 7 Dose Rate vs. short circuit current in the range of 1~10 r/m)

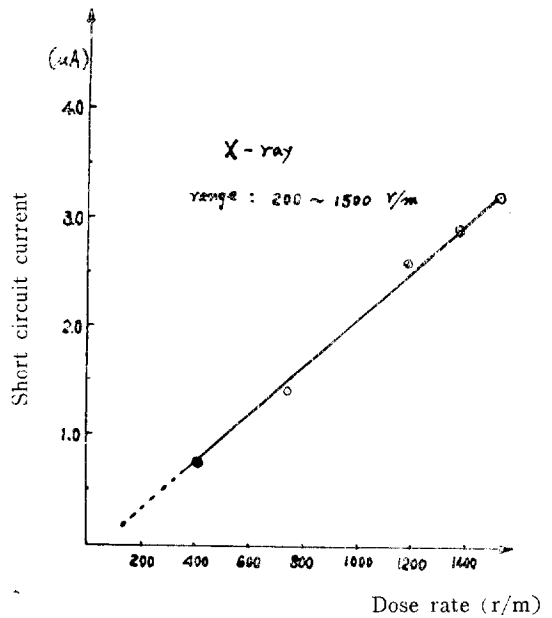


그림 9. 100~1600 r/m 範圍 에 있어서의 Dose Rate 와 short circuit current 와의 關係
(Fig. 9 Dose Rate vs short circuit current in the range of 100~1600 r/m)

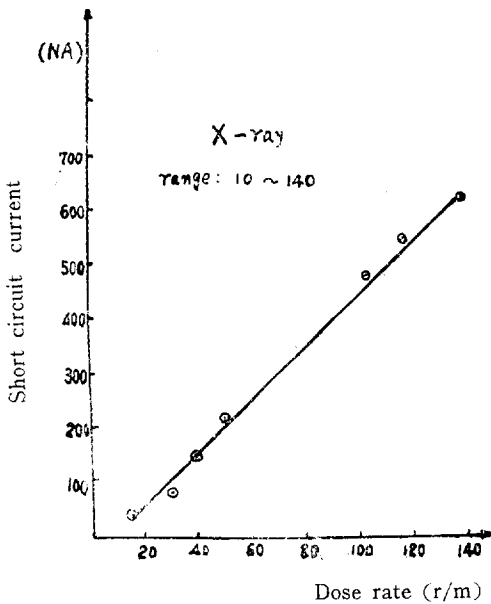


그림 8. 10~100 r/m 範圍에 있어서의 Dose Rate 와 short circuit current 와의 關係
(Fig. 8 Dose Rate vs. short circuit current in the range of 10~100 r/m)

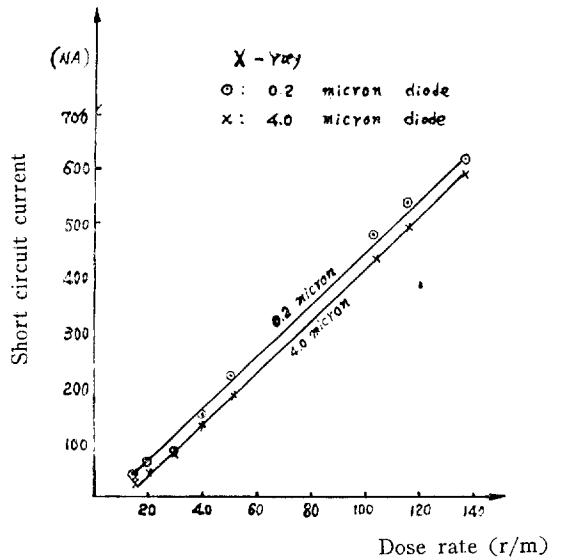


그림 10. Diffusion depth 가 0.2 micron 인 것과 4.0 micron 인 두 檢出器 特性의 比較
(Fig. 10 Comparison of the two detectors having the diffusion depths of 0.2 micron and 4.0 microns)

Diffusion depth가 0.2 micron 인 것은 表面에 0.036 mg/cm² 의 얇은 n-type 層을 가지고 있어 window effect 는 거의 無視할수 있다. 이것은 寫眞 (1)에 보이고 있는 것 처럼 transistor case 內에 封入했으며 表面은 case 의 上部를 둥글게 (直徑 約 5 mm) 뚫어 X-ray 는 바로 n-type 半導體面으로 入射하게 되어 있다. Short circuit current 測定에 使用한 電流計는 Hewlett Packard Model 425 A · DC micro volt-ammeter 로서 10⁻¹² ampere 까지 測定할수 있으며 精密度도 相當히 높다. X-ray 및 γ -ray Dose Rate calibration 에는 Victoreen Model 570 condenser r-meter 를 使用하였다. 測定된 X-ray source 는 General Electric Co. 製의 Maxitron 250 으로서 當研究所에 設置된 治療用 X-ray 發生裝置를 利用했으며, γ -source 는 韓一病院 放射線科에 設置된 2000 curie 의 Cs^{137} source 와 放射醫學研究所에 設置된 3000 curie 의 Co^{60} source 를 使用하였다. X-ray Dose Rate 의 測定에 있어서는 管球電壓은 250 KV 및 100 KV 로 固定하고 管球電流만을 變化 시키거나 電壓, 電流를 모두 一定하게 하고 filter 를 바꾸어 Dose Rate 를 더러가지로 바꾸면서 最低 Dose Rate 인 0.05 r/m 으로부터 最高 範圍 1600 r/m 까지를 4 個 範圍로 나누어 Dose Rate 對 short circuit current 의 關係를 測定한바 그림 6, 그림 7, 그림 8 및 그림 9 에서 보는 바와 같은 좋은 直線性을 보여 주고 있다. 그리고 檢出器의 表面으로부터 P-N Junction 까지의 距離가 0.2 micron 인 때와 4.0 micron 인때의 Dose Rate 와 電流關係를 보면 그림 10 과 같이 4.0 micron 일 때에는 曲線이 全般的으로 0.2 micron 것의 아래로 平行 移動한 結果를 보여 주고 있다. 이것은 式 (6)에 따른 photon 의 吸收가 많아진 때문이라고 생각 한다. 그러나 이 差異는 別로 크지 않으므로 4.0 micron 의 것을 實用化하는 것이 훨씬 經濟的이다. 參考로 0.2 micron 檢出器의 製作費는 4.0 micron 것의 約 5 倍나 더 많다는 事實을 여기에 덧붙여 둔다. 다음 662 keV 인 Cs^{137} 의 γ -ray 測定結果는 그림 11 과 같다. 여기에서도 Dose Rate 와 short circuit current 와의 直線性은 X-ray 때와 마찬가지로 좋다. 그러나 이 γ -ray 는 X-ray 에 比하여 energy 가 훨씬 큰 662 keV 나 되므로 大部分 半導體를 透過해 버린다. 半導體內에서 完全 阻止되는 photon 의 數가 入射하는 全 photon 數에 比하여 大端히 적으므로(이 比를 普通 檢出效率이라고 부른다) 같은 量의 Dose Rate 에 對하여 外部에 흐르는 電流에는 X-ray 의 경우와 顯著한 差異를 나타낸다. 即 X-ray 의 경우 約 100 r/m 의 Dose Rate 에 對하여 約 0.4 micro-ampere 의 電流가 흐름에 反하여 Cs^{137} 의 γ -ray

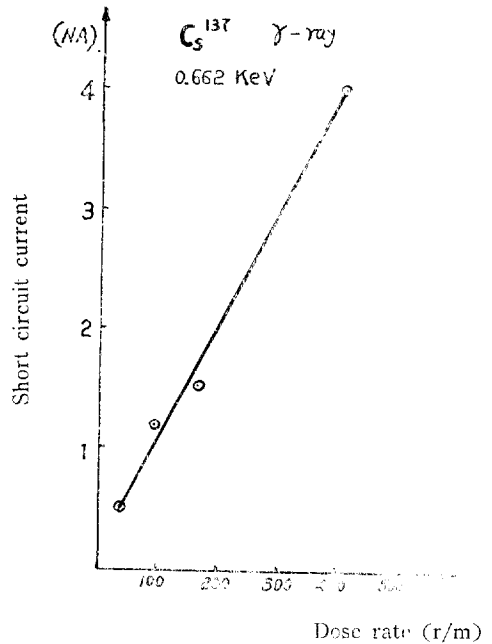


그림 11. Cs^{137} 의 γ -ray Dose Rate 와 short circuit current 와의 關係
(Fig. 11 Dose Rate vs. short circuit current for the Gamma-ray of Cs^{137})

경우 不過 1.5 nano-ampere 程度밖에 흐르지 않음을 그림 8 과 그림 11 의 比較로서 알수 있다. 이와 같은 photon 의 透過現象은 Cs^{137} 보다 energy 가 約 2 倍로서 1.17 MeV 와 1.33 MeV 인 Co^{60} 의 γ -ray 경우 더욱 顯著하게 나타나고 있다. 그러나 注目해야할 事實은 阻止되는 效率이 大端히 적음에도 불구하고 이의 直線性이 잘 維持 된다고 하는 것은 檢出器의 앞에다가 適當한 filter 를 놓아 γ -ray 의 大部分의 energy 를 여기서 吸收시키고 X-ray 程度로 弱화시킨 것이 檢出器에 들어가도록 하기 만 하면 X-ray 와 똑같은 效率로서 測定될수 있음이 確實視되고 있다. 여기에 使用될 filter 는 Cs^{137} 의 경우 energy 가 다르므로 filter 用 材料의 種類와 두께는 앞으로 繼續 研究할 課題로서 남아 있다.

6. 結 論

위의 實驗結果에서 보는 바와 같이 Silicon P-N Junction Diode 에 있어 photovoltaic effect 에 依한 short circuit current 는 X-ray 나 γ ray 의 좋은 測定 parameter 가 되고 있다. X-ray 의 경우에는 dc micro-ammeter 에 直接 r/m 의 눈금으로 calibrate 하면 Dose Rate 를 直讀할수 있게 되고 γ -ray 의 경우는 各 energy

範圍別로 filter를 사용하여 눈금을 calibration 하면 이것도亦是 直讀할수 있게 될것이다. 이 rate meter의 應用으로서 X-ray 및 γ -ray source로부터 距離에 따른 Dose Rate의 分布曲線 即 isodose curve를 測定하기 爲하여 現在 X-Y slide를 製作하여므로 그 結果를 여기에 提示부등을 變換으로 생각 한다. 이 檢出器의 壽命은 X-ray 및 γ -ray에 對하여 10^8 rad 程度이므로, 1000 r/m의 Dose Rate로서도 約 2,000時間을 使用할수 있을 것이다.

7. 致 謝

本 實驗을 爲하여 C_{60}^{60} source 利用의 便宜를 모아 주셨고 直接 實驗을 爲하여 協調해주신 放射醫學研究所長 安致烈博士와 C_{137} source를 利用케 해주신 韓一病院 放射線科長 安柄善氏에게 甚深한 謝意를 表하는 바입니다.

參 考 文 獻

1. R.L. Cumberow; "Photovoltaic Effect in P-N Junctions" Physical Review, Vol. 95 pp. 16-21 July (1954).
2. R. Greunelmaier; "Irradiation of P-N Junctions with Gamma Rays: A Method for Measuring Diffusion Lengths" Proc. IRE, Vol. 46 No. 6 pp. 1045-1059 June (1958).
3. W. Heitler; "The Quantum Theory of Radiation" Oxford University Press, New York, N. Y. 1944.
4. Landolt-Bornstein; "Physikalische-Chemische Tabellen," Springer-Verlag, Berlin, Vol. 1952 Sec. Pt. 5, pp. 351-360.

(1964年 8月 25日 接受)