

Rivelatori a semiconduttore

Motivazione: aumentare il numero di portatori di informazione a parità di energia rilasciata nel materiale

Semiconduttori: Si e Ge

Formano cristalli solidi in cui gli atomi formano 4 legami covalenti

Il reticolo periodico stabilisce bande di energia permesse per gli elettroni: “banda di conduzione” e “banda di valenza” separate da gap (0.7 eV per Ge, 1.1 eV per Si)

Probabilità per unità di tempo, alla temperatura T , di passaggio nella banda di conduzione (e quindi di produzione di una coppia elettrone-lacuna):

$$p(T) = C T^{3/2} e^{\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)}$$

con T temperatura assoluta, E_g salto di energia tra le bande e k costante di Boltzmann.

Rivelatori a semiconduttore

A temperatura ambiente: $n_i = p_i = 1.5 \cdot 10^{10}$ ($2.4 \cdot 10^{13}$) cm^{-3} in Si (Ge)

All'applicazione di un campo elettrico E si ha

$$|\underline{J}| = n_i e (|\underline{v}_e| + |\underline{v}_i|)$$

con $\underline{v}_e = -\mu_e \underline{E}$ e $\underline{v}_h = \mu_h \underline{E}$

velocità di deriva di elettroni e lacune

$\mu_e \approx 1350$ (3900) cm^2/Vs in Si(Ge)

$\mu_h \approx 480$ (1900) cm^2/Vs in Si(Ge)

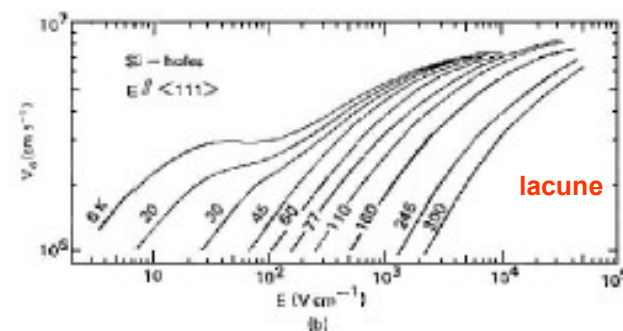
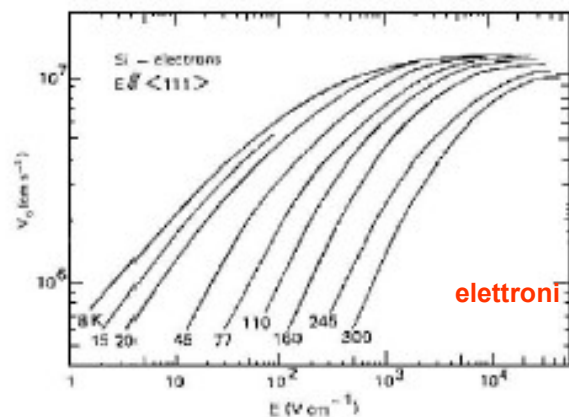
corrispondente ad una resistività

$\rho = 1/[en_i(\mu_e + \mu_h)] \approx 2 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}$ (ideale)

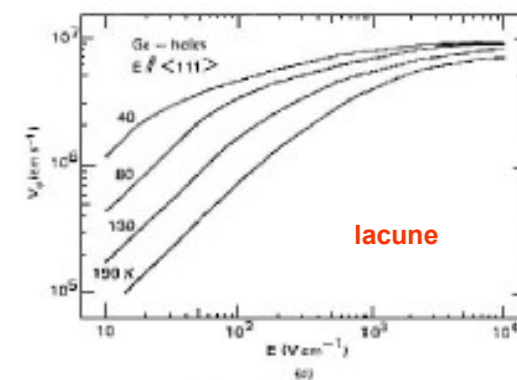
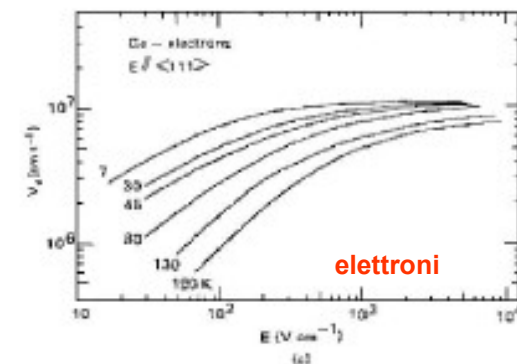
$\approx 5 \cdot 10^4 \Omega \text{ cm}$ (reale)

troppo bassa per l'utilizzo ai fini della rivelazione

Si



Ge



Per una lamina $A = 1 \text{ cm}^2$ e $s = 1 \text{ mm}$
 $\rightarrow R = 5 \text{ k}\Omega \rightarrow$ se $V = 100 \text{ V}$ si ha $I = 20 \text{ mA}$
 da confrontarsi con 10^{-6} A dovuti alle cariche prodotte dalla radiazione ionizzante

Rivelatori a semiconduttore

Motivazione: aumento della resistività del materiale semiconduttore

Monocristallo ideale di Silicio puro

| | |
|---|----------------------|
| Atomi/cm ³ | 5 10 ²² |
| Densita' intrinseca di portatori (a 300K) cm ⁻³ | 1.5 10 ¹⁰ |
| Energia per creare una coppia lacuna-elettrone (a 300 K) eV | 3.62 |
| Fattore di Fano medio | 0.12 |

1) Specializzazione dei portatori di informazione: drogaggio

legge di azione di massa (a temperatura ambiente)

$$n_n p_n = n_i p_i = 2.25 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$$

Caso n

concentrazione di donatori (P, As) di 5 10¹⁶ cm⁻³

$$n_n = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, p_n = 4.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

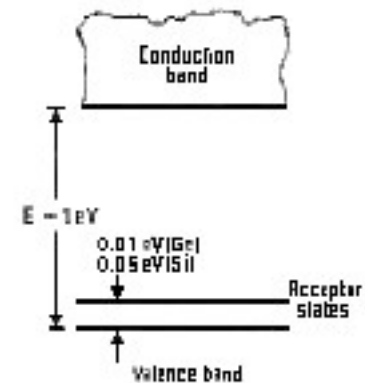
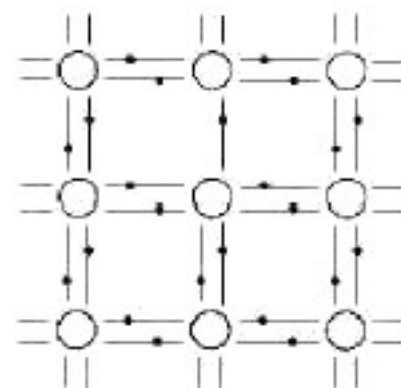
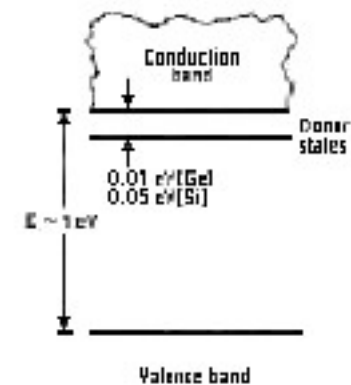
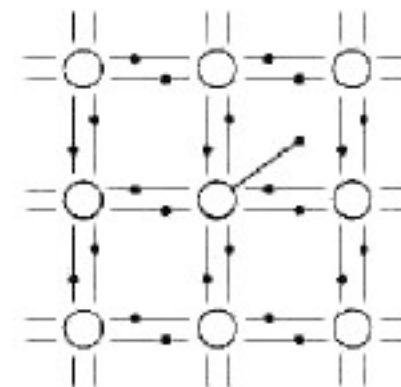
portatori di maggioranza

portatori di minoranza

Caso p

concentrazione di accettori (B, Al) di 5 10¹⁶ cm⁻³

$$p_p = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, n_p = 4.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

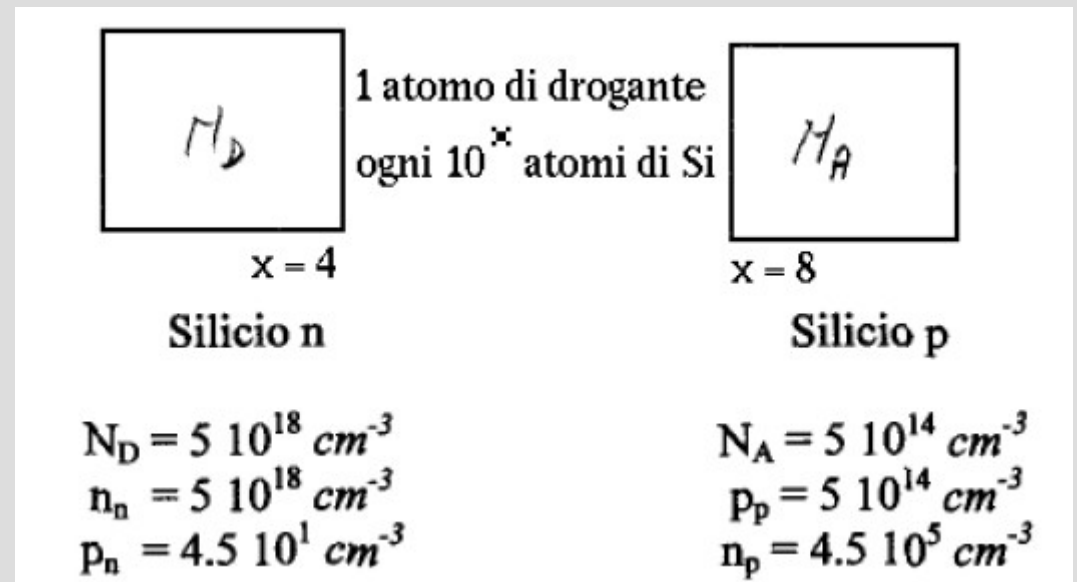


Rivelatori a semiconduttore

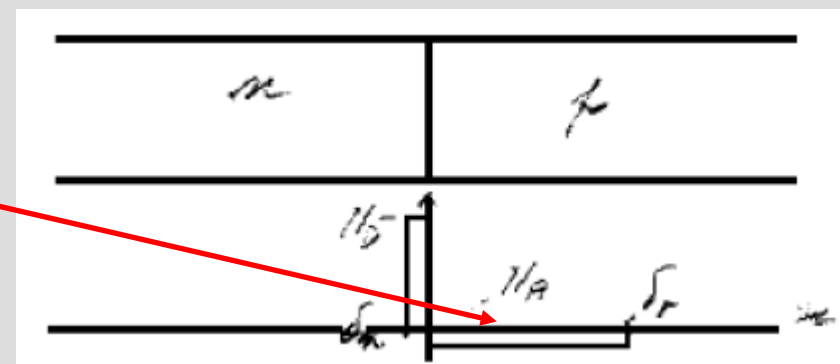
Motivazione: aumento della resistività del materiale semiconduttore

2) Produzione di giunzioni tra semiconduttori drogati diversamente

Giunzioni p-n asimmetriche



zona di svuotamento



Rivelatori a semiconduttore

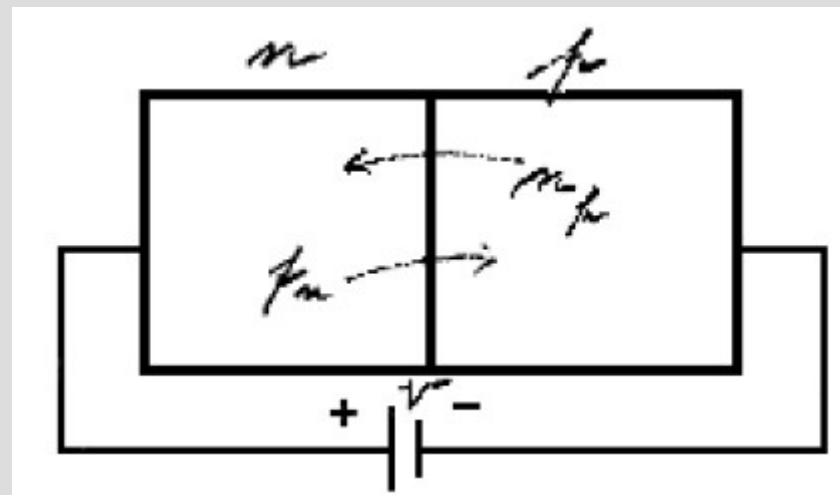
2) Produzione di giunzioni tra semiconduttori drogati diversamente

Polarizzazione inversa

La corrente è portata dai portatori di minoranza



il valore della corrente inversa è collegato al drogaggio del materiale meno drogato



una parte del rumore elettrico è determinato dalle fluttuazioni della corrente inversa

ampia zona di svuotamento

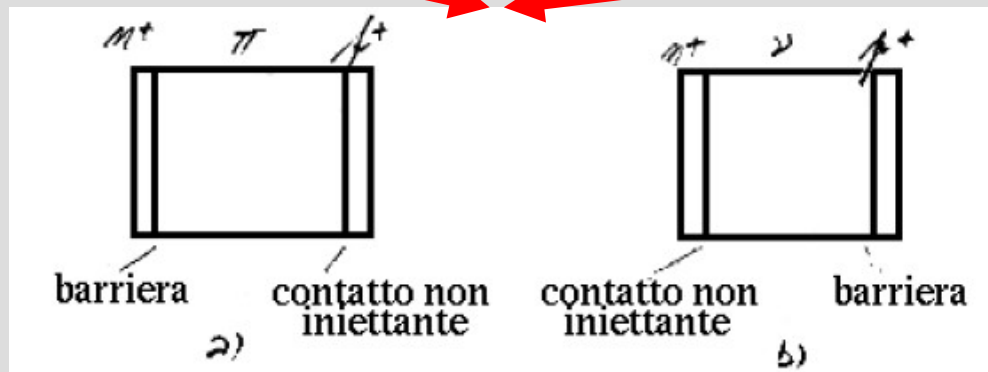
una delle due zone sia poco o pochissimo drogata

n^+, p^+

10^{20} cm^{-3}

ν, π

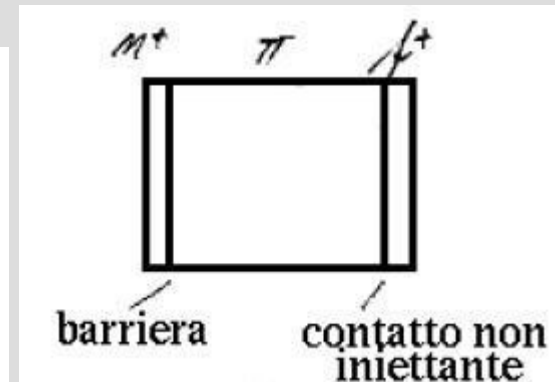
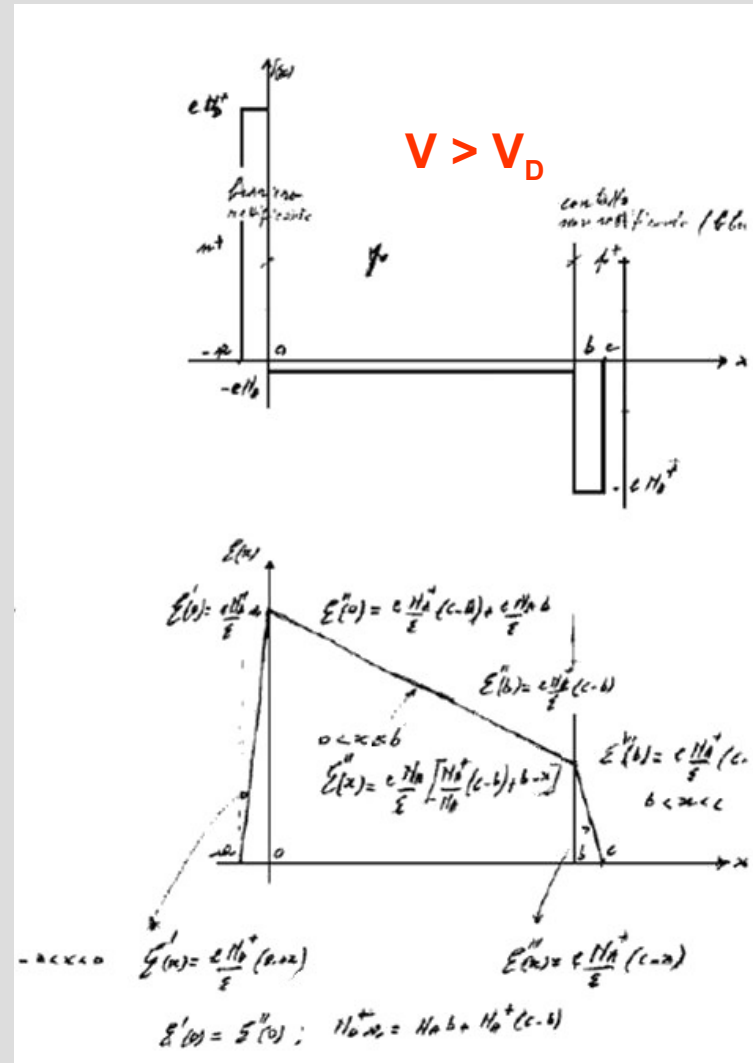
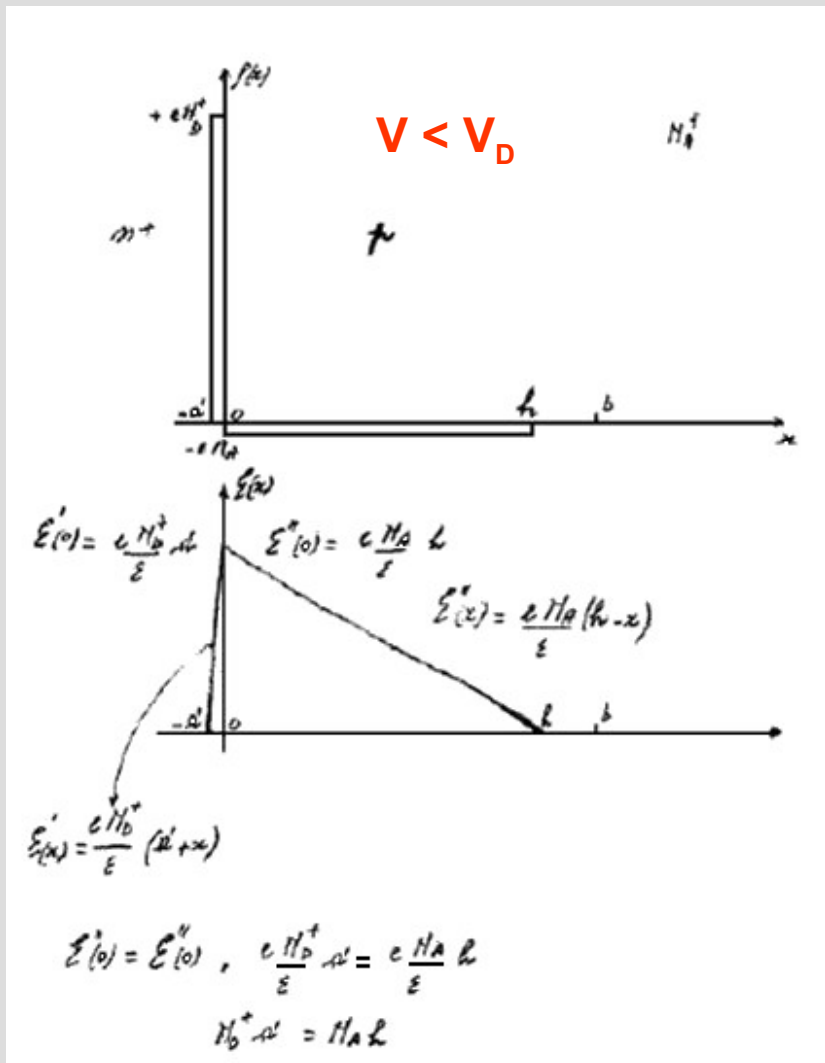
$\leq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$



Rivelatori a semiconduttore

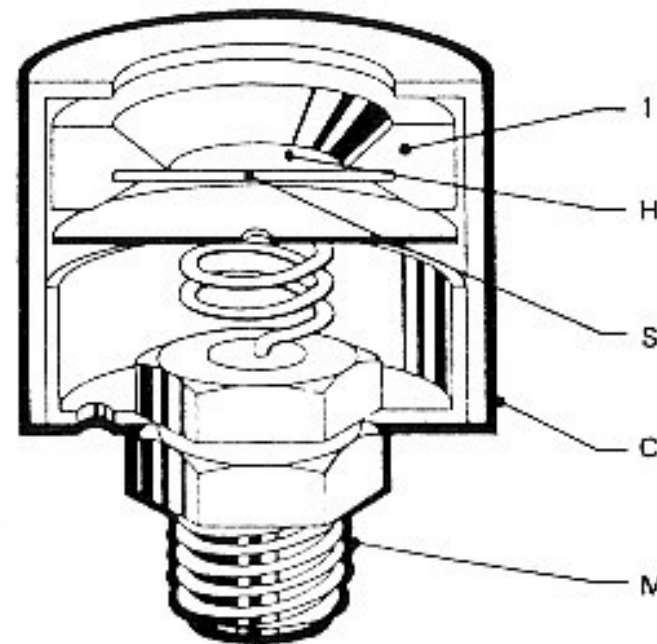
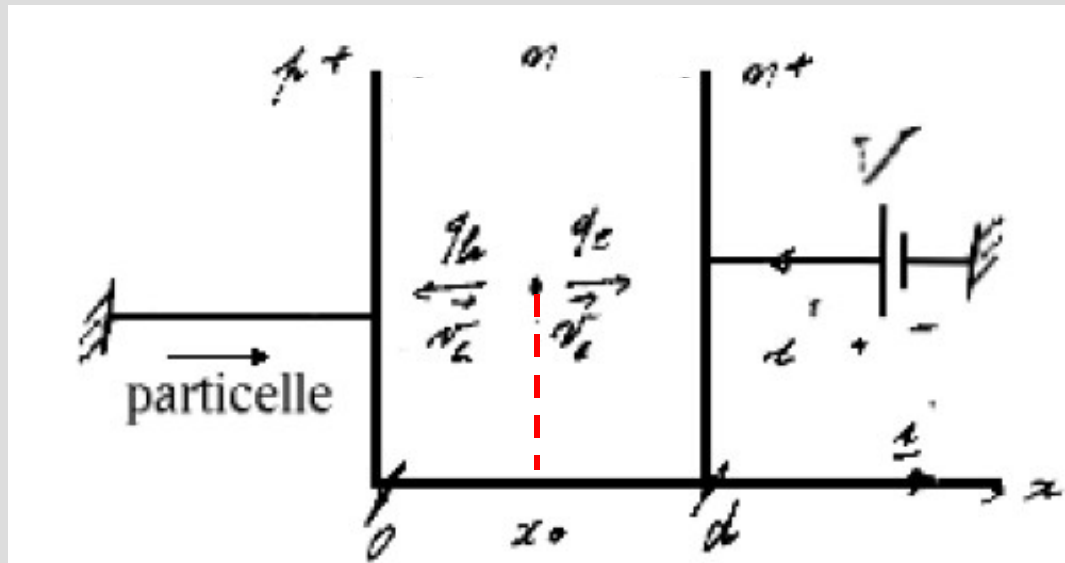
2) Produzione di giunzioni tra semiconduttori drogati diversamente

Polarizzazione inversa Distribuzioni di carica e campi elettrici

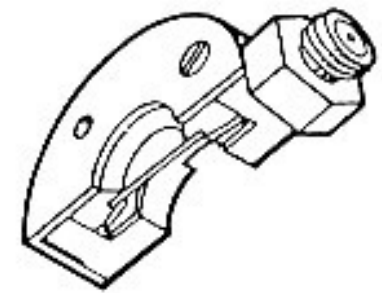


Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC (p^+vn^+)



(a)



(b)

Rivelatori a semiconduttore

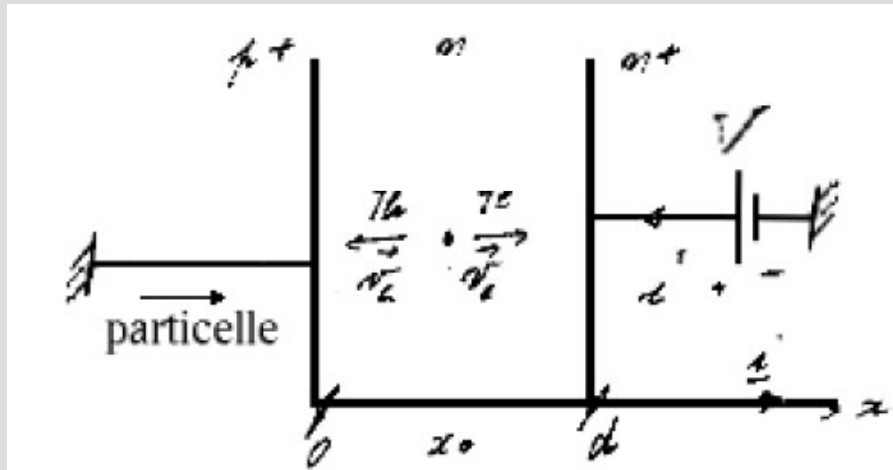
Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC (p^+vn^+) BA-016-150-1000

risoluzione elettronica in keV

superficie sensibile mm^2

spessore in μm



Resistività e drogaggio numerico

$$\rho_R = \frac{1}{ne\mu} \Omega m \text{ con } n \text{ in } m^{-3} \text{ e } \mu \text{ in } m^2 V^{-1} s^{-1}$$

| Resistività ρ_R $k\Omega cm$ | Si-n $N_D^+ (cm^{-3})$ | Si-p $N_A^- (cm^{-3})$ |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | $4.63 \cdot 10^{12}$ | $1.3 \cdot 10^{13}$ |
| 10 | $4.63 \cdot 10^{11}$ | $1.3 \cdot 10^{12}$ |
| 20 | $2.31 \cdot 10^{11}$ | $6.5 \cdot 10^{11}$ |
| 100 | $4.63 \cdot 10^{10}$ | $1.3 \cdot 10^{11}$ |

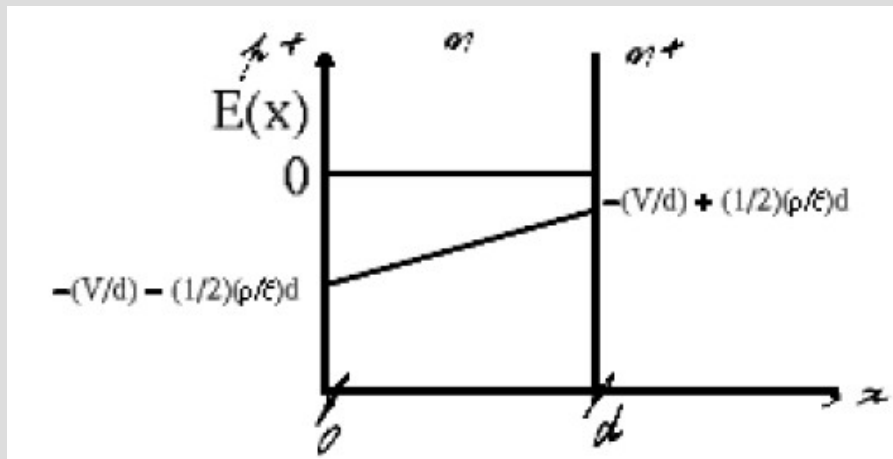
ρ_R (nominale) = 130 Ωm ; V (tensione di lavoro) = 350 V
 C (capacità della superficie attiva) = $\frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} = \frac{10^{-10} \cdot 150 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 15 \text{ pF}$

Determinazione del campo elettrico

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

In condizioni di svuotamento o di sovrasvuotamento (ρ costante da 0 a d)

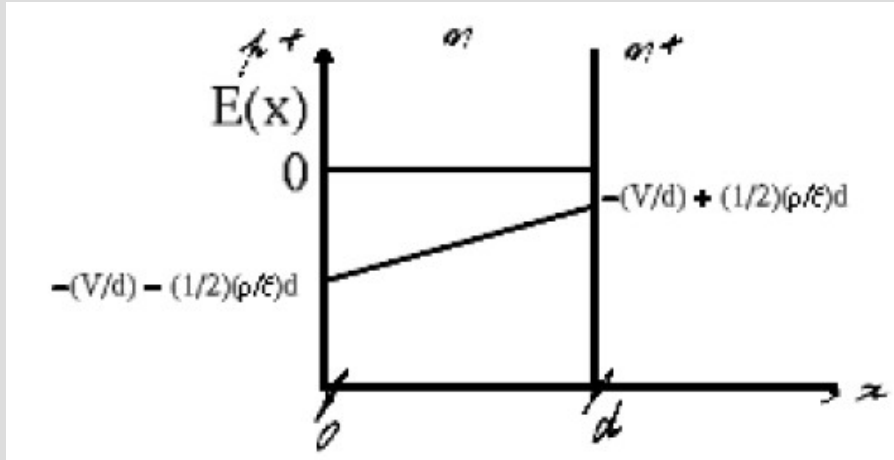
$$E(x) = \left(-\frac{V}{d} - \frac{1}{2} \frac{\rho}{\epsilon} d\right) + \frac{\rho}{\epsilon} x = a + bx \quad \text{con} \quad a = -\frac{V}{d} - \frac{1}{2} \frac{\rho}{\epsilon} d \quad \text{e} \quad b = \frac{\rho}{\epsilon}$$



Rivelatori a semiconduttore

Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC (p^+vn^+) BA-016-150-1000



$$E(x) = \left(-\frac{V}{d} - \frac{1}{2}\frac{\rho}{\epsilon}d\right) + \frac{\rho}{\epsilon}x = a + bx \quad \text{con} \quad a = -\frac{V}{d} - \frac{1}{2}\frac{\rho}{\epsilon}d \quad \text{e} \quad b = \frac{\rho}{\epsilon}$$

tensione di svuotamento V_D

$$E(d)=0 \rightarrow \rho = 2\epsilon V_D/d^2 \quad \text{ma} \quad \rho = eN_D^+ = e/\rho_R \epsilon \mu_e$$

$$V_D = d^2 / (2\epsilon_r \epsilon_0 \rho_R \mu_e) = 275 \text{ V}$$

misura della capacità

In condizioni di svuotamento parziale (ρ costante da 0 a s)

$$s \simeq \left(\frac{2\epsilon V}{eN_D}\right)^{1/2}$$

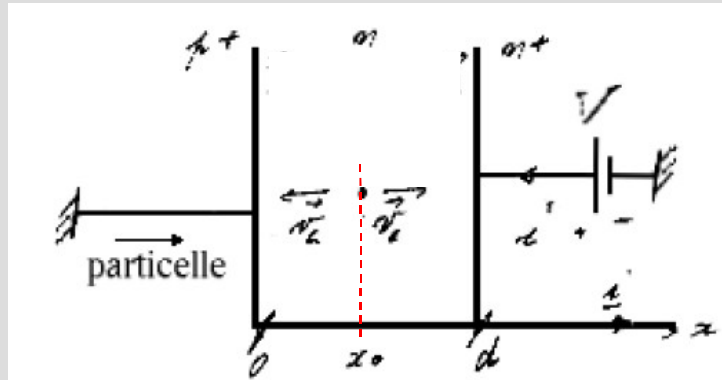
capacità per unità di area

$$C = \frac{\epsilon}{s} \simeq \left(\frac{e\epsilon N}{2V}\right)^{1/2}$$

$$C = kV^{-n} \rightarrow \ln C = \ln k - n \ln V$$

Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC (p^+vn^+)



con $\tau_e = \frac{1}{-\mu_e b}$

$$i_e(t) = \frac{1}{V}(-e)(v_e \vec{i}) \cdot \left(-\frac{V}{d} \vec{i}\right) = \frac{e}{d} v_e = -\frac{e}{d} \mu_e (a + bx_0) e^{-\frac{t}{\tau_e}} \quad \text{per } 0 < t < \tau_e \ln \frac{a + bx_0}{a + bd}$$

$$q_e(t) - q_e(0) = \int_0^t i_e(t) dt = -\frac{e}{d} \mu_e (a + bx_0) \tau_e \int_0^{\frac{t}{\tau_e}} e^{-\frac{t}{\tau_e}} d\frac{t}{\tau_e} = \left[-\frac{e}{bd} (a + bx_0)\right] [1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}]$$

$$i_h(t) = \frac{1}{V}(e)(-v_h \vec{i}) \cdot \left(-\frac{V}{d} \vec{i}\right) = \frac{e}{d} v_h = -\frac{e}{d} \mu_h (a + bx_0) e^{+\frac{t}{\tau_h}} \quad \text{per } 0 < t < \tau_h \ln \frac{a}{a + bx_0}$$

$$q_h(t) - q_h(0) = \int_0^t i_h(t) dt = -\frac{e}{d} \mu_h (a + bx_0) \tau_h \int_0^{\frac{t}{\tau_h}} e^{\frac{t}{\tau_h}} d\frac{t}{\tau_h} = \left[-\frac{e}{bd} (a + bx_0)\right] [e^{\frac{t}{\tau_h}} - 1]$$

- Calcolo di $a, b, bd/a$

$$a = -(350 + 270)/10^{-3} = -6.2 \cdot 10^5 \text{ Vm}^{-1} \quad b = 540/10^{-6} = 5.4 \cdot 10^8 \text{ Vm}^{-2}$$

$$b/a = -5.4 \cdot 10^8 / 6.2 \cdot 10^5 = -871 \text{ m}^{-1} \quad bd/a = -871 \cdot 10^{-3} = -0.871$$

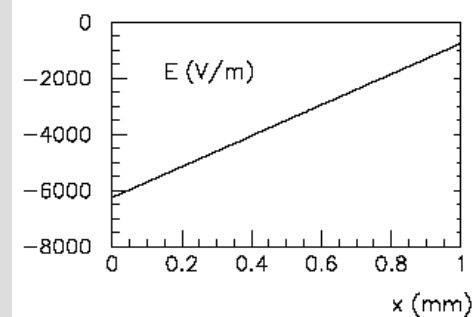
- Calcolo di τ_e

$$\tau_e = 1/(\mu_e b) = 1/(0.135 \cdot 5.4 \cdot 10^8) = 10 \cdot 10^{-8} / (7.89) = 13.7 \text{ ns}$$

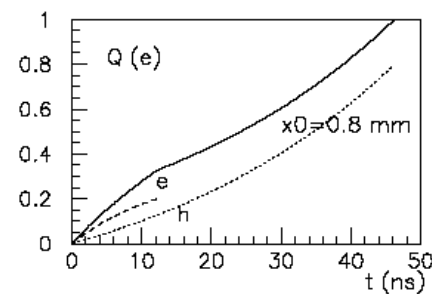
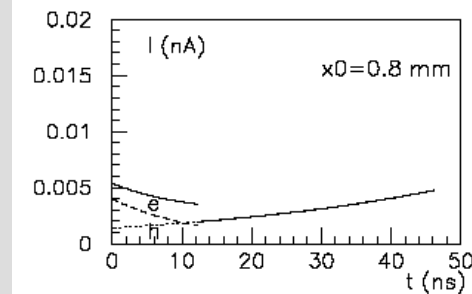
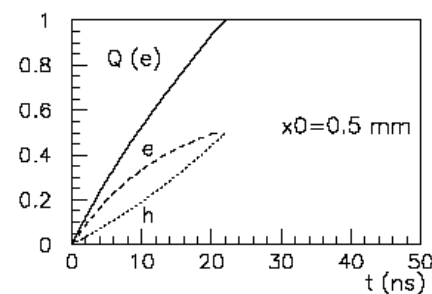
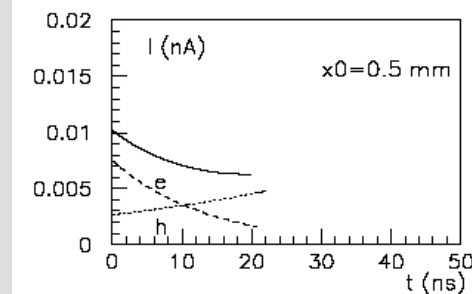
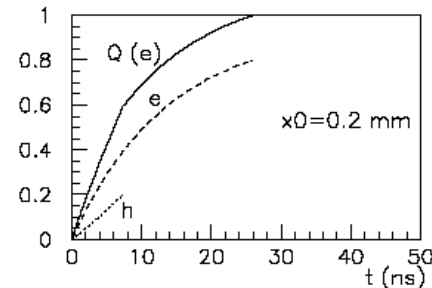
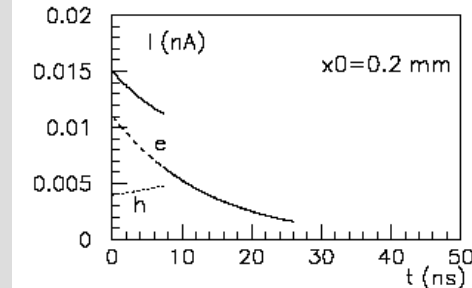
- Calcolo di $t_e (x_0 = 0)$

$$t_e (x_0 = 0) = 13.7 \text{ ns} \cdot \ln 1/[1 + (bd/a)] = 13.7 \text{ ns} \cdot \ln 1/[1 - 0.871] = 28 \text{ ns}$$

ORTEC BA-016-150-1000

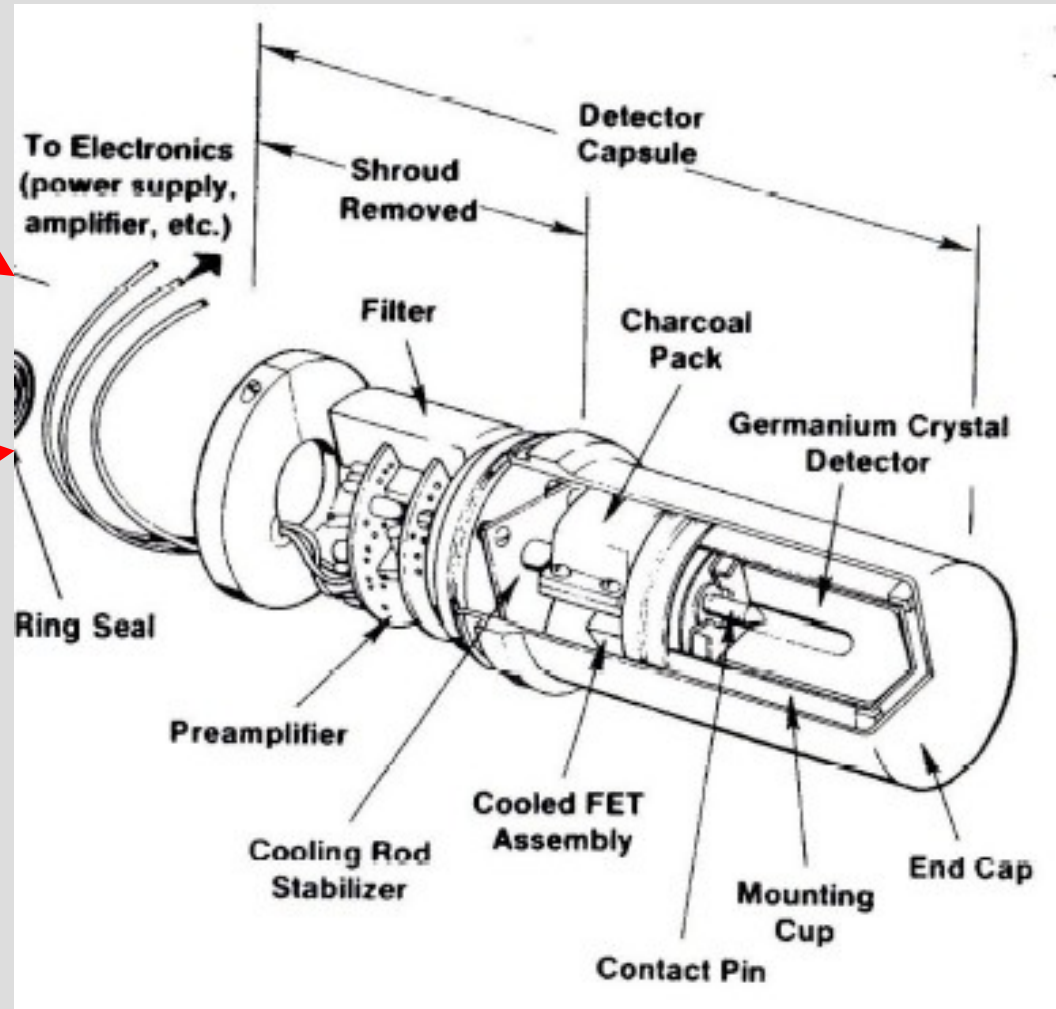
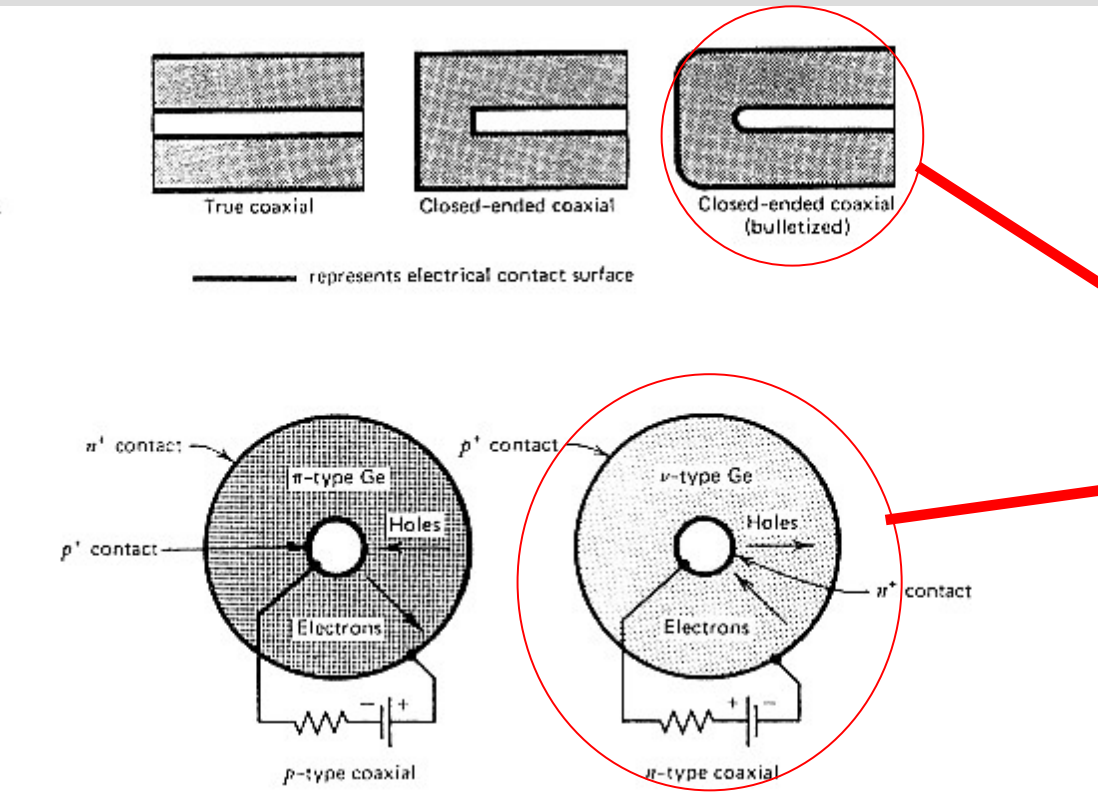


$\rho = 13000 \text{ } \Omega\text{cm}$
 $V = 350 \text{ V}$



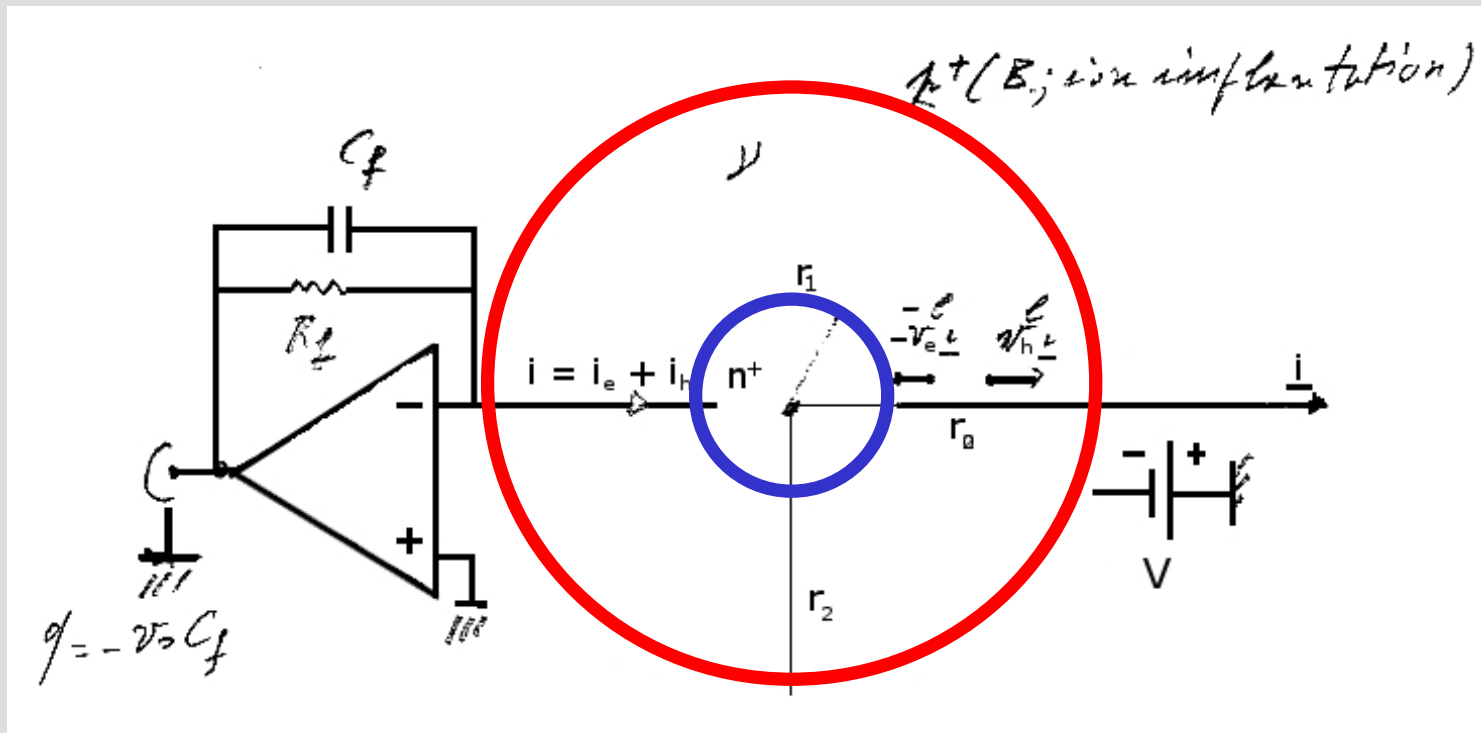
Rivelatori a semiconduttore

Rivelatori a semiconduttore coassiali Hp-Ge (true coaxial)



Rivelatori a semiconduttore

Rivelatori a semiconduttore coassiali Hp-Ge (true coaxial)



tipo ν ($N_D = 6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$)

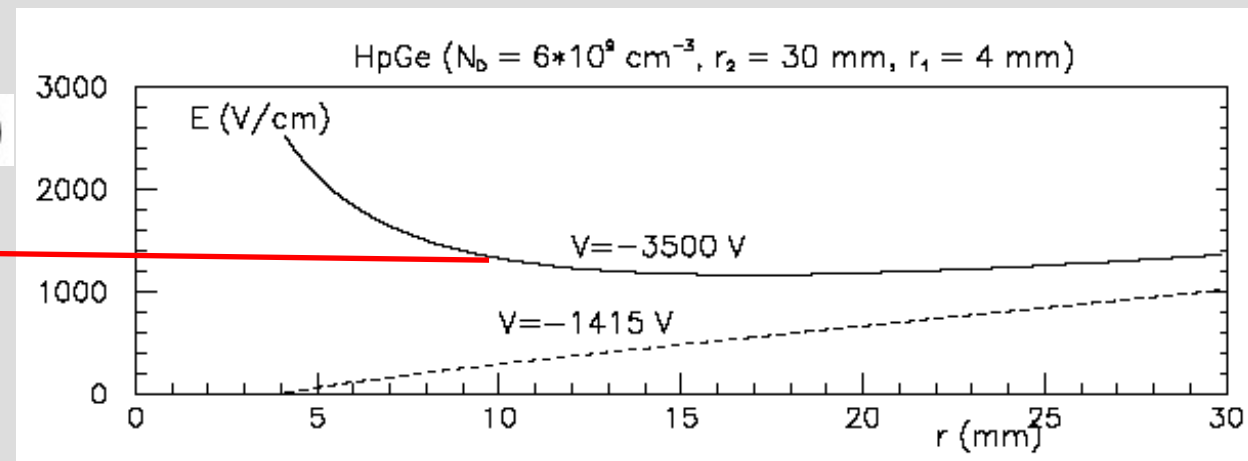
$r_1 = 4 \text{ mm}$; $r_2 = 30 \text{ mm}$.

$$\frac{1}{r} \left[\frac{d(r E_r)}{dr} \right] = \rho / \epsilon$$

$$E_r = (\rho / 2\epsilon) r + \left\{ [V - (\rho / 4\epsilon)(r_2^2 - r_1^2)] / \ln(r_2 / r_1) \right\} (1/r)$$

$E_r > 1000 \text{ V/cm}$

Le velocità degli elettroni e delle lacune sono uguali tra loro e prossime al valore di saturazione



Rivelatori a semiconduttore

Rivelatori a semiconduttore coassiali Hp-Ge (true coaxial)

moto elettroni: $0 < t < t_e \rightarrow t = (r_0 - r_1)/v_e$

$$i_e(t) = \frac{ev_e}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{r_0 - v_e t}$$

$$q_e(t) - q_e(0) = \frac{e}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r_0}{r_0 - v_e t}$$

moto lacune: $0 < t < t_h \rightarrow t = (r_2 - r_0)/v_h$

$$i_h(t) = \frac{ev_h}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{r_0 + v_h t}$$

$$q_h(t) - q_h(0) = \frac{e}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r_0 + v_h t}{r_0}$$

