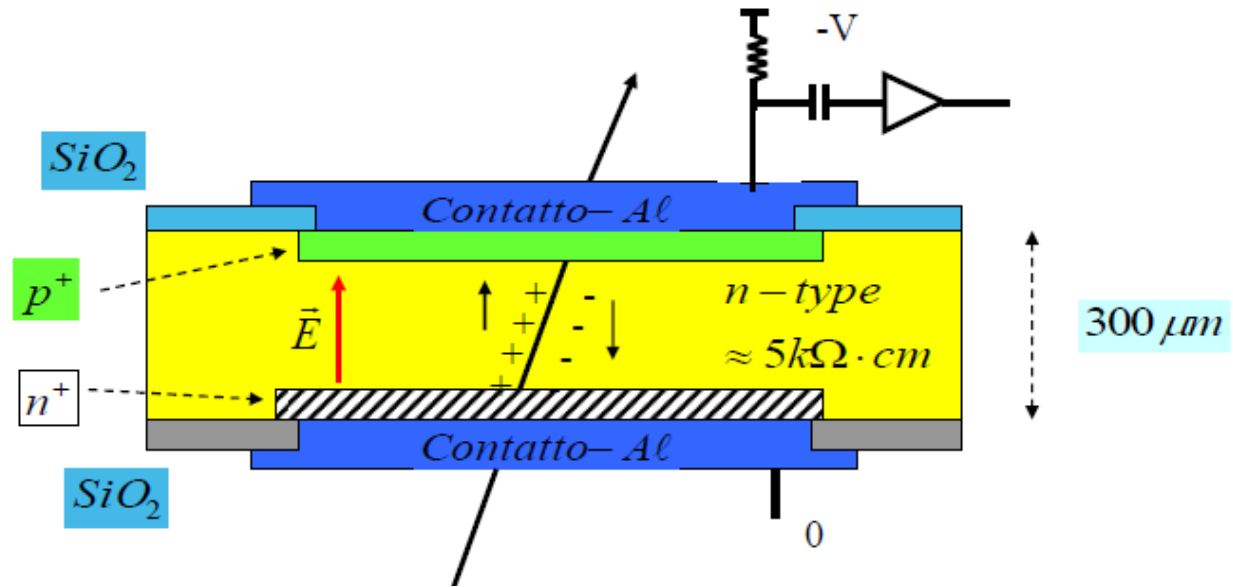


CAMERE A IONIZZAZIONE A STATO SOLIDO

Di principio, degli elettrodi depositati su un cristallo isolante consentono di realizzare un contatore a ionizzazione.



Rispetto al gas:

- Più denso \Rightarrow più sottile (300 μm di Si)
- Carica sufficiente senza moltiplicazione
- Utilizza i portatori di entrambi i segni
- Bassa energia di ionizzazione

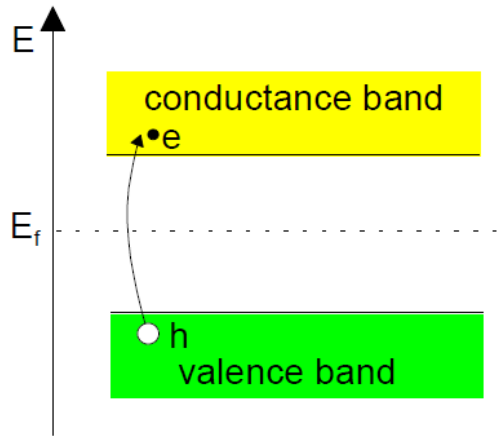
E' necessario:

- Energia di ionizzazione piccola ($E_i < 20\text{eV}$)
- Mobilità elevata
- Vita media dei portatori elevata ($\tau > 100\text{ }\mu\text{s}$)
- **Leakage basso (pochi portatori liberi a T_{amb})**

Queste caratteristiche si trovano (quasi) tutte in Si, Ge, GaAs (semiconduttori)

Questo non è possibile con Si e Ge che hanno gap di energia fra le bande di valenza e di conduzione rispettivamente di 1.1 eV e 0.67 eV. A T_{amb} c'è già conduzione

DENSITA' DI PORTATORI IN SEMICONDUTTORI INTRISECI



Per eccitazione termica si hanno transizioni di e^- tra banda di valenza e conduzione.

La conducibilità dipende da entrambi i portatori (n e p) e cresce al crescere della temperatura.

Il livello di Fermi è a metà' del gap

Nei semiconduttori intrinseci (non drogati):

$$n_i = p_i \quad np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

Densità degli stati ai bordi delle bande

Fattore termico: raddoppio ogni 8°C

Si (a T_{amb}) $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Ge (a T_{amb}) $n_i = 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

MOBILITA' E RESISTIVITA'

Mobilita' $\mu_{e,h}$

$$\vec{v} = \mu_{e,h} \vec{E}$$

μ dipende dal campo E (saturazione per alti campi)
e dalla densita' di drogante (materiali estrinseci)

	Si	Ge
$\mu_e \text{ cm}^2/\text{Vs}$	1350	3900
$\mu_h \text{ cm}^2/\text{Vs}$	480	1900

con $E \approx 1 \text{ kV/cm}$ $v \approx 1 \text{ cm}/\mu\text{s}$

come nei gas!

Resistivita' ρ

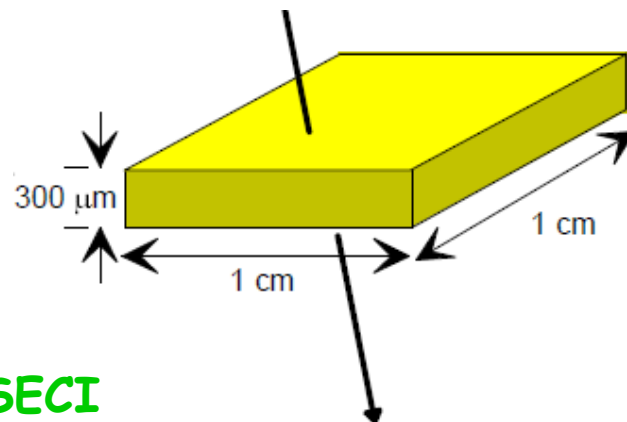
$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$$

Semiconduttori intrinseci (puri)

Si $\rho = 230 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$, Ge $\rho = 45 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$

In questo volume ci sono 4.5×10^8 cariche libere
ma solo 3.2×10^4 coppie e-h prodotte da una MIP

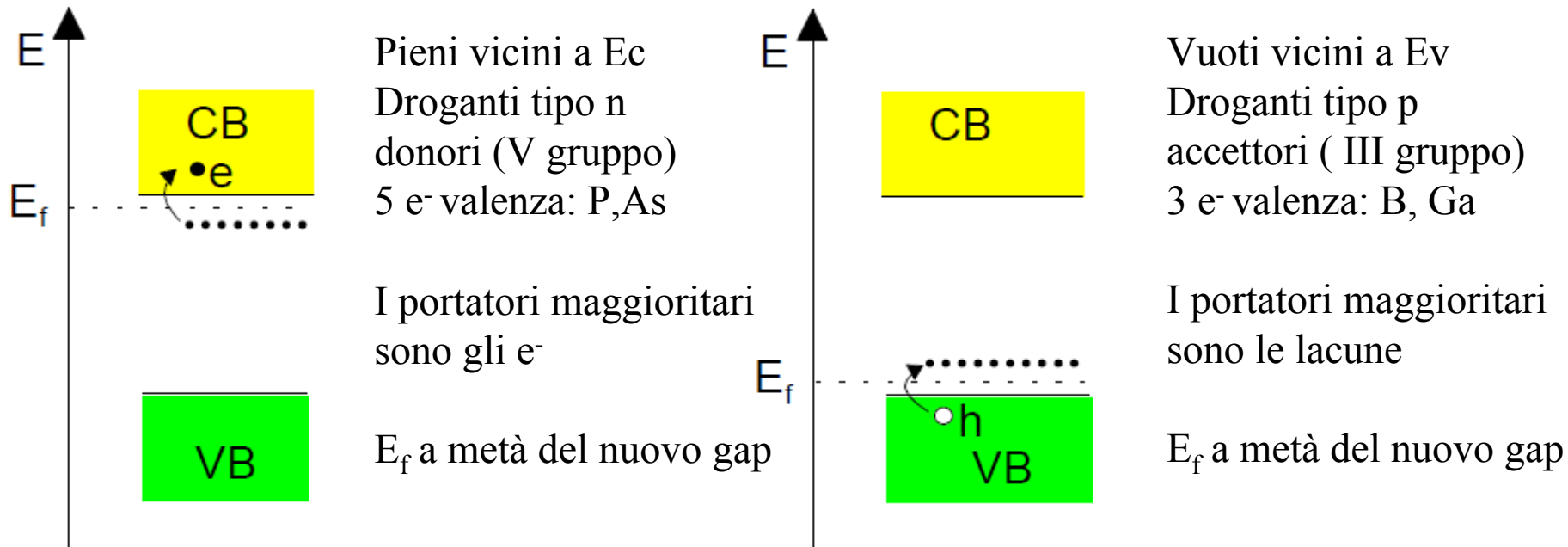
NON POSSO USARE Si E Ge INTRINSECI



SEMICONDUTTORI DROGATI (ESTRINSECI)

Drogaggio: sostituzione di un atomo del cristallo con un elemento diverso (semiconduttore estrinseco)

I droganti introducono dei livelli energetici intermedi:



Tipiche energie di ionizzazione per le impurezze aggiunte: 10 meV
Molti portatori di carica liberi per la sola energia termica

SEMICONDUTTORI DROGATI (ESTRINSECI)

N_D : CONCENTRAZIONE IMPUREZZE "DONATRICI" ELETTRONI IN ECCESSO
 N_A : CONCENTRAZIONE IMPUREZZE "ACCETTRICI" ELETTRONI IN DIFETTO

SE LA CONDUZIONE È DOMINATA DAI PORTATORI PROVENIENTI DA IMPUREZZE, SI DICE CHE IL SEMICONDUTTORE È ESTRINSECO.

PER UN SEMICONDUTTORE ESTRINSECO SI HA:

TIPO n	$N_D \gg N_A$	$n \approx N_D$	$p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$
		\uparrow kT ambiente	
TIPO p	$N_A \gg N_D$	$p \approx N_A$	$n = \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$

SEMICONDUTTORI DROGATI (ESTRINSECI)

ESEMPIO :

Si : $n_i \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

SE $N_D \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

$n \approx N_D \approx 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

$p \approx n_i^2 / N_D \approx 10^3 \text{ cm}^{-3}$

e : PORTATORI MAGGIORITARI

h : (MINORI) : PORTATORI MINORITARI

(ANALOGO IL CASO CON h MAGGIORITARI)

SE $N_A \approx N_D$: MATERIALI "COMPENSATI"

SE $N_{A,D} \geq 10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$: MATERIALI "PESANTEMENTE" "DROGATI"

CONDUCE CONDUCE METALLICA .

SIMBOLI: n^+ , p^+

RIVELAZIONE DI PARTICELLE IONIZZANTI

ENERGIA CINETICA
DELLA PARTICELLA

→ COPPIE $e - h$
(DA RACCOLGERE
CON UN CAMPO)

E : ENERGIA NECESSARIA IN MEDIA PER CREARE UNA
COPPIA ELETTRONE - LACUNA
(ANALOGO DEL W PER I GAS)

VALORI TIPICI DI E .

	Ge	Si	
$E(300K)$		3.62	[ev]
$E(77K)$	2.96	3.76	
	↑	↑	LEGATO AL VALORE DEL GAP

OSSERVIAMO CHE: $E \sim \frac{1}{10} W$

↑ EFFETTO BENEFICO
SULLA RISOLUZIONE

INFATTI:

ENERGIA
DEPOSITA

N_{GAS}

E/W

$N_s = E/\epsilon$

NO COPPIE
PORTATORI

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\text{POISSON}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \Rightarrow \frac{(\Delta N/N)_s}{(\Delta N/N)_{\text{GAS}}} = \frac{\sqrt{N_{\text{GAS}}}}{\sqrt{N_s}} = \sqrt{\frac{E}{W}} \approx \frac{1}{3}$$

→ CON QUESTO RAGIONAMENTO GROSSOLANO, VEDIAMO
CHE PER UN SOLIDO SEMICONDUCTORE LA RISOLUZIONE
È CIRCA 3 VOLTE MIGLIORE CHE PER UN GAS A
PARITÀ DI ENERGIA.

→ IL FATTORE DI FANO F MIGLIORA
ULTERIORMENTE LA RISOLUZIONE

CONFIGURAZIONE INGENUA :



→ NON PUÒ FUNZIONARE!

INFATTI : $\rho = 5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ PER IL PIÙ PURO Si DISPONIBILE

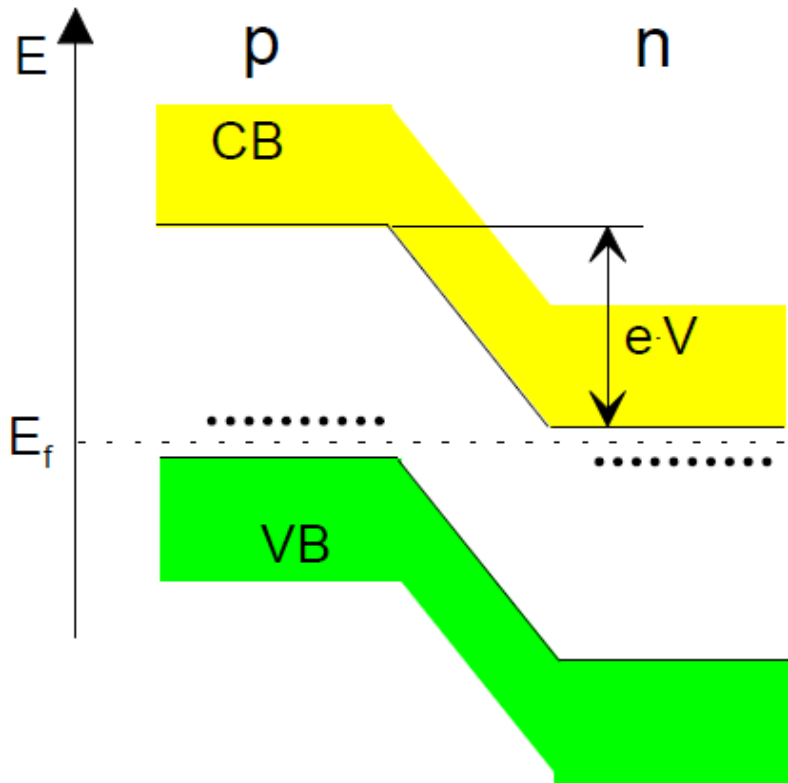
→ $R = 50 \text{ k}\Omega$ PER UN CUBO DI 1 cm^3 , CONTATTI SU
DUE FACCE OPPOSITE -

$$V = 500 \text{ V} \Rightarrow I = 10^{-2} \text{ A}$$

→ QUESTA CORRENTE È MOLTO MAGGIORE DI QUELLA
CHE CI SI PUÒ RAGIONEVOLMENTE ASPETTARE DA UN
IMPULSO SINGOLO DI PARTICELLA.

GIUNZIONE p-n POLARIZZATA

Occorre un meccanismo per rimuovere il più possibile i portatori liberi, estrinseci o intrinseci, presenti nel materiale



Utilizziamo un semiconduttore intrinseco e drogiamolo da un lato p e dall' altro n

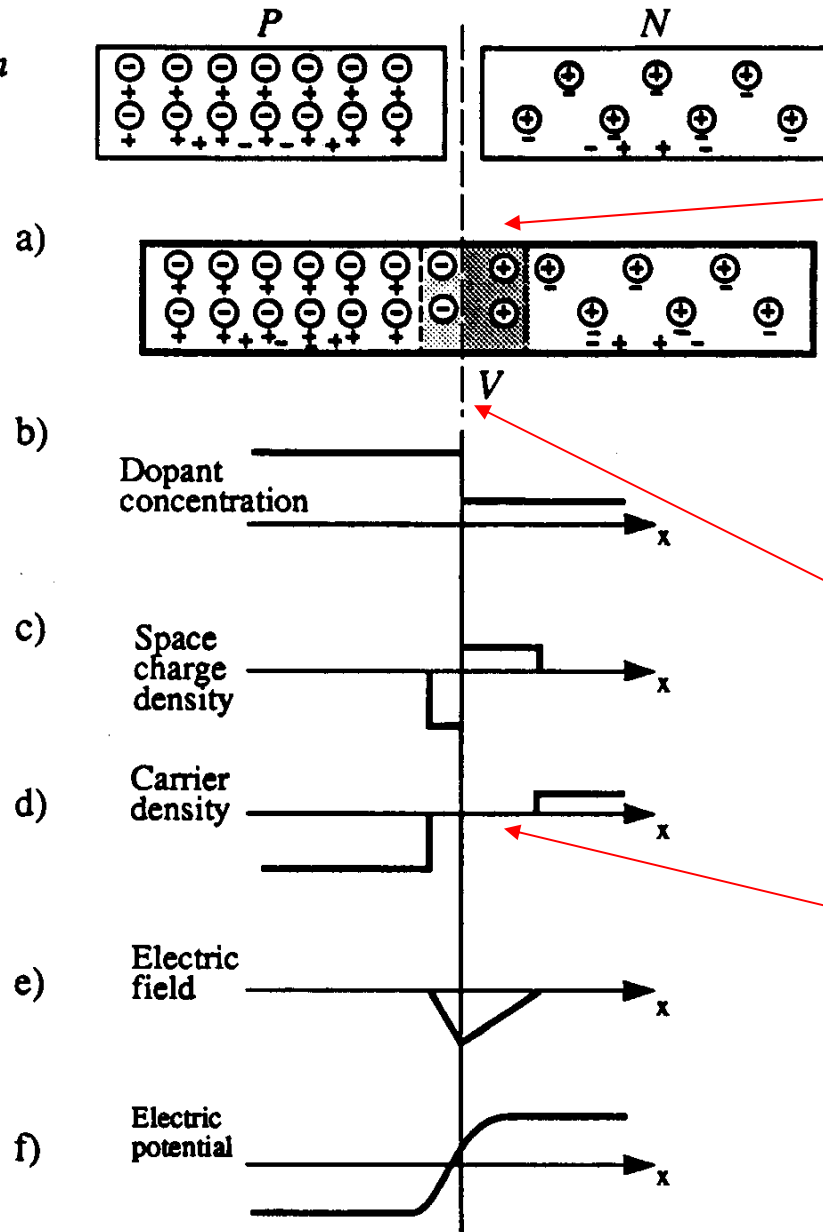
Il livello di Fermi dev' essere unico

Deformazione della struttura a bande

└─> differenza di potenziale

\ominus Acceptor ion
 \oplus Donor ion
 $+$ Hole
 $-$ Electron

THE PN JUNCTION



Gli elettroni diffondono nel P ,
 le lacune nell'N
 → si crea una differenza di
 potenziale
 → la diffusione si ferma

Regione di svuotamento
 non ci sono portatori di carica liberi.

Nessuna carica libera nella
 regione di svuotamento

FENOMENOLOGIA DELLA GIUNZIONE p-n

- ALL'EQUILIBRIO, LA CORRENTE DI DIFFUSIONE (OSTACOLATA DAL CAMPO ELETTRICO STABILITO DALLA CARICA SPAZIALE) È ESATTAMENTE BILANCIATA DALLA CORRENTE DI GENERAZIONE

↳ I PORTATORI MINORITARI TERMICAMENTE GENERATI ATTRAVERSAANO L'INTERVALLO ASSEGNATO DAL CAMPO ELETTRICO.

- APPLICANDO UNA DIFFERENZA DI POTENZIALE ALLA GIUNZIONE CHE SI SOMMA A QUELLA CORRISPONDENTE AL CAMPO ELETTRICO DOVUTO ALLA CARICA SPAZIALE,

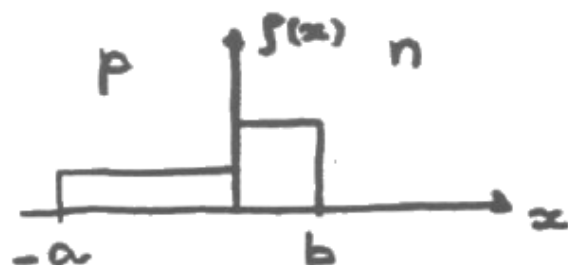
— LA CORRENTE DI DIFFUSIONE SI RIDUCE (FINO AD ANNULLARSI PER GRANDI V)

— LA CORRENTE DI GENERAZIONE RIMANE COSTANTE (È DETERMINATA DAL N° DI PORTATORI)

— LA REGIONE DI SVUOTAMENTO SI ALLARGA

↓
CORRENTE DI FUGA:
 $\propto \exp(-E_g/kT)$

- CONDIZIONE DI NEUTRALITÀ:



$$N_A \cdot a = N_D \cdot b$$

$$\frac{a}{b} = \frac{N_D}{N_A}$$

$$N_D \gg N_A \Rightarrow a \gg b$$

↑

LA GIUNZIONE SI ESTENDE
NELLA ZONA MENO DROGATA

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_A & -a < x < 0 \\ +eN_D & 0 < x < b \end{cases}$$

SE $\phi(x)$ È IL POTENZIALE, SAPPIAMO CHE: $\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \begin{cases} \frac{eN_A}{\epsilon} & -a < x < 0 \\ -\frac{eN_D}{\epsilon} & 0 < x < b \end{cases}$$

INTEGRANDO UNA VOLTA E CAMBIANDO DI SEGNO

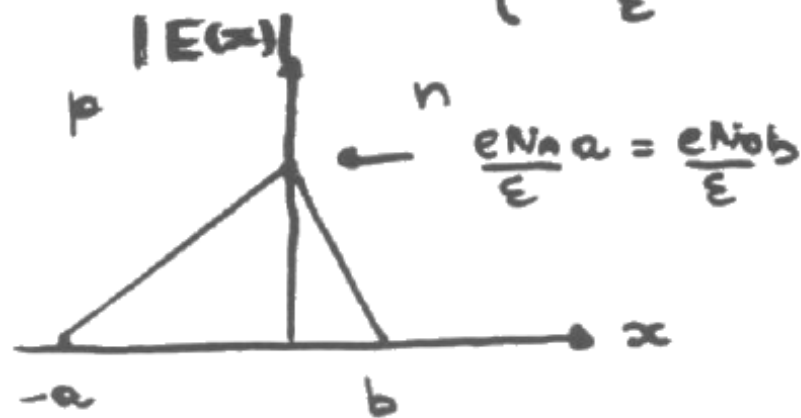
$$-\frac{d\phi}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_A}{\epsilon} x + C_1 \\ +\frac{eN_D}{\epsilon} x + C_2 \end{cases}$$

↑
CAMPO ELETTRICO $E(x)$

CONDIZIONI AL CONTORNO:

$$E(-a) = E(b) = 0$$

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{eN_n}{\epsilon}(x+a) \\ \frac{eN_o}{\epsilon}(x-b) \end{cases} \quad \leftarrow \text{PER } x=0 \text{ I DUE VALORI SONO UGUALI GRAZIE ALLA CONDIZIONE DI NEUTRALITÀ.}$$



DIFFERENZA DI POTENZIALE AI LAPI DELLA GIUNZIONE

$$V_T = \left| \int_{-a}^b E(x) dx \right| =$$

$$= \left| \int_{-a}^0 E(x) dx + \int_0^b E(x) dx \right| =$$

$$= \left| \int_{-a}^0 \left(-\frac{eN_n}{\epsilon}(x+a) \right) dx + \int_0^b \frac{eN_o}{\epsilon}(x-b) dx \right| =$$

$$= \left| \left[-\frac{eN_n}{2\epsilon}(x+a)^2 \right]_{-a}^0 + \left[\frac{eN_o}{2\epsilon}(x-b)^2 \right]_0^b \right| =$$

$$= \left| -\frac{eN_n}{2\epsilon} a^2 - \frac{eN_o}{2\epsilon} b^2 \right| = \frac{e}{2\epsilon} (N_n a^2 + N_o b^2)$$

ESSENDO: $N_D \approx N_A \frac{a}{b}$:

$$V_T = \frac{q}{2\epsilon} \left(N_A a^2 + N_A \frac{a}{b} b^2 \right) = \frac{q N_A}{2\epsilon} a (a + b)$$

MA: $a \gg b \Rightarrow a \approx a + b \equiv d$
↑
PROFONDITÀ DELLA REGIONE SVUOTATA

$$V_T = \frac{q N_A}{2\epsilon} d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon V_T}{q N_A}}$$

\Rightarrow LA GIUNZIONE HA UNA CAPACITÀ:

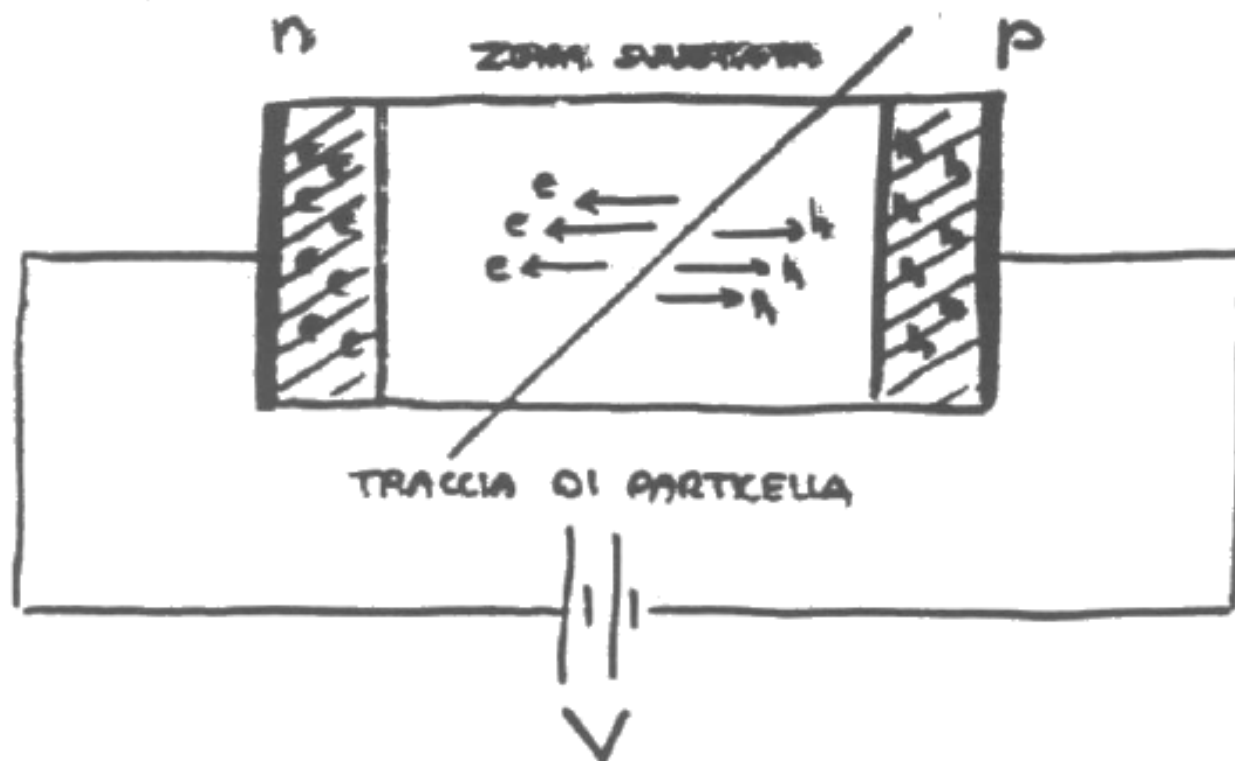
$$C = \frac{\epsilon}{d} = \sqrt{\frac{q N_A \epsilon}{2 V_T}}$$

PER AVERE AMPIE REGIONI SVUOTATE, OCCORRE:

- AVERE GRANDI V_T - $V_T = V + V_b \approx V$ PER GRANDI V APPLICATI
- AVERE MATERIALI MOLTO POCO DROGATI NELLA ZONA IN CUI SI VUOL FARE ESTENDERE LA GIUNZIONE (N_A MOLTO PICCOLO \rightarrow IMPORTANTISSIMA LA PUREZZA DEL MATERIALE)
 - \hookrightarrow MATERIALE DI PERTENENZA A ALTA RESISTIVITÀ INTRINSECA

IN BASE A QUANTO DETTO, È POSSIBILE OPERARE
IN MODO CHE:

REGIONE SVUOTATA \equiv PARTE SENSIBILE DI
UN RIVELATORE.



IL MATERIALE DI PARTENZA DEVE ESSERE MOLTO PURO
ANCHE PER EVITARE CENTRI DI RICOMBINAZIONE
E DI INTRAPPOLAMENTO.

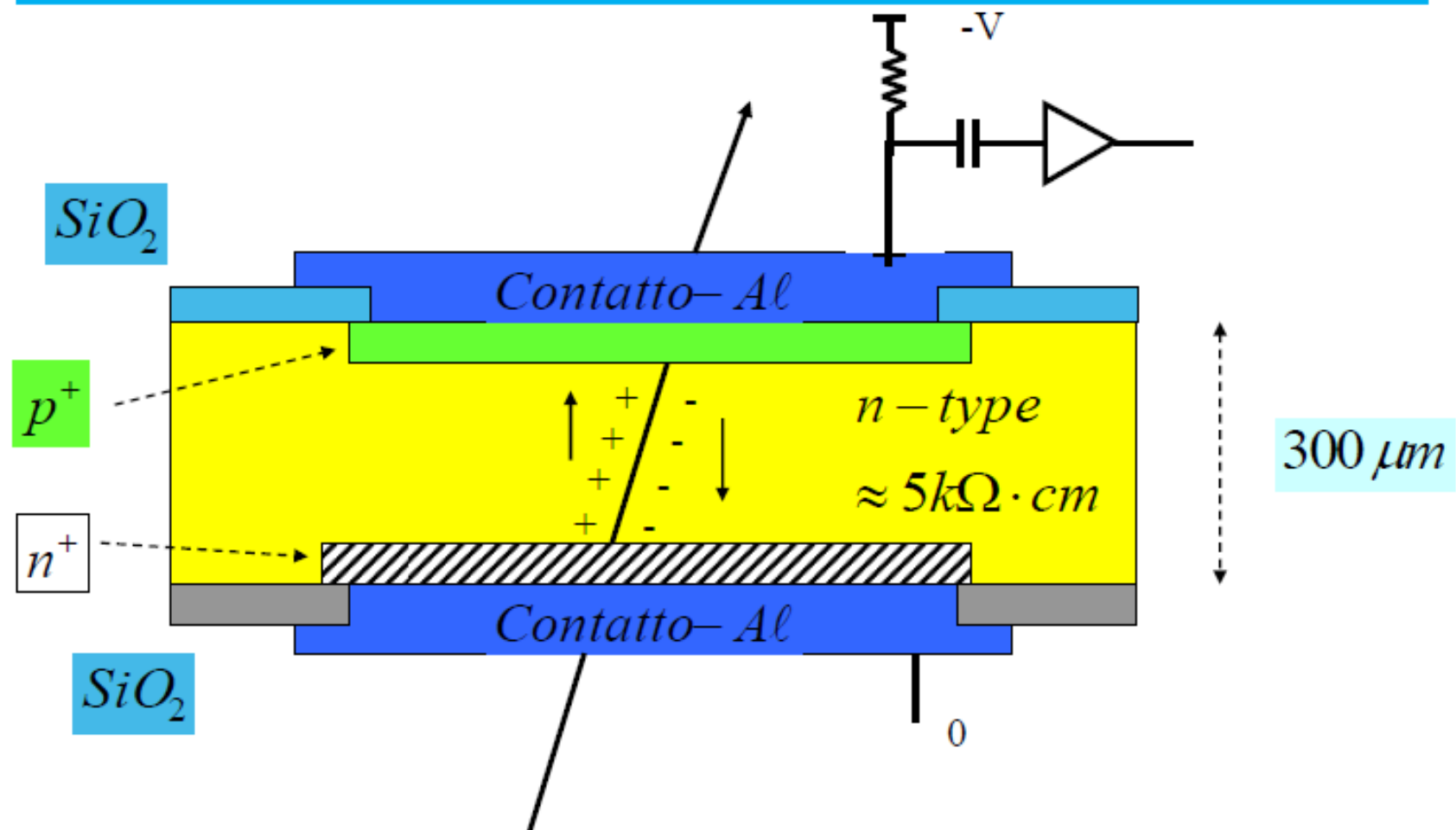
Giunzione polarizzata inversamente come rivelatore di particelle

- ❑ Polarizzando inversamente il diodo ($V_B \sim 100V$ a n+) \rightarrow la zona di carica spaziale in cui e' presente il campo elettrico si estende \rightarrow diodo completamente svuotato $d \sim x_n \sim (2\varepsilon V_B / qN_d)^{1/2}$

$$x_d = \sqrt{2\varepsilon\mu} \cdot \sqrt{\rho V} = 0.53 \mu m \cdot \sqrt{\rho(\Omega cm) \cdot V(V)}$$

- ❑ Il deposito di energia nella zona completamente svuotata, dovuto al passaggio della particella carica, crea delle coppie libere e-lacuna.
- ❑ Nel campo elettrico, gli elettroni derivano verso il lato n, le lacune verso il lato p inducendo un segnale sugli elettrodi di raccolta \rightarrow corrente rivelabile
- ❑ La zona svuotata dai portatori e' la parte attiva del rivelatore perche' il campo $E \neq 0$

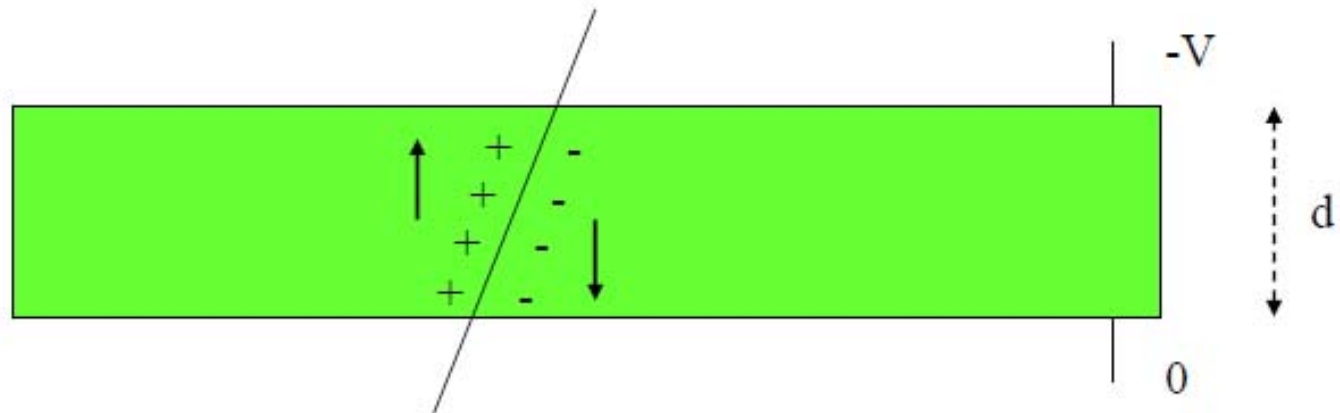
Schema di rivelatore al Silicio



Motivazioni scelte tecniche

- **Silicio n-type $5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$** : Disponibilita' e costo
- **Drogaggio n^+** : definisce la fine della zona svuotata e forma un buon contatto ohmico
- **Drogaggio p^+** : per fare la giunzione
- **Contatto Al**: collegamento elettrico, Al facile da depositare e forma buon contatto
- **Ossido SiO_2** : Passivazione evita che alla superficie del Si restino legami non chiusi che formano centri di intrappolamento e generazione
- **300 μm** : tecnologia elettronica OK (300-1000 μm)

Formazione del segnale



- Il moto della carica induce sugli elettrodi

$$q(t) \propto (1 - \exp(-t / \varepsilon \rho))$$

- Tempo di raccolta (85% della carica)

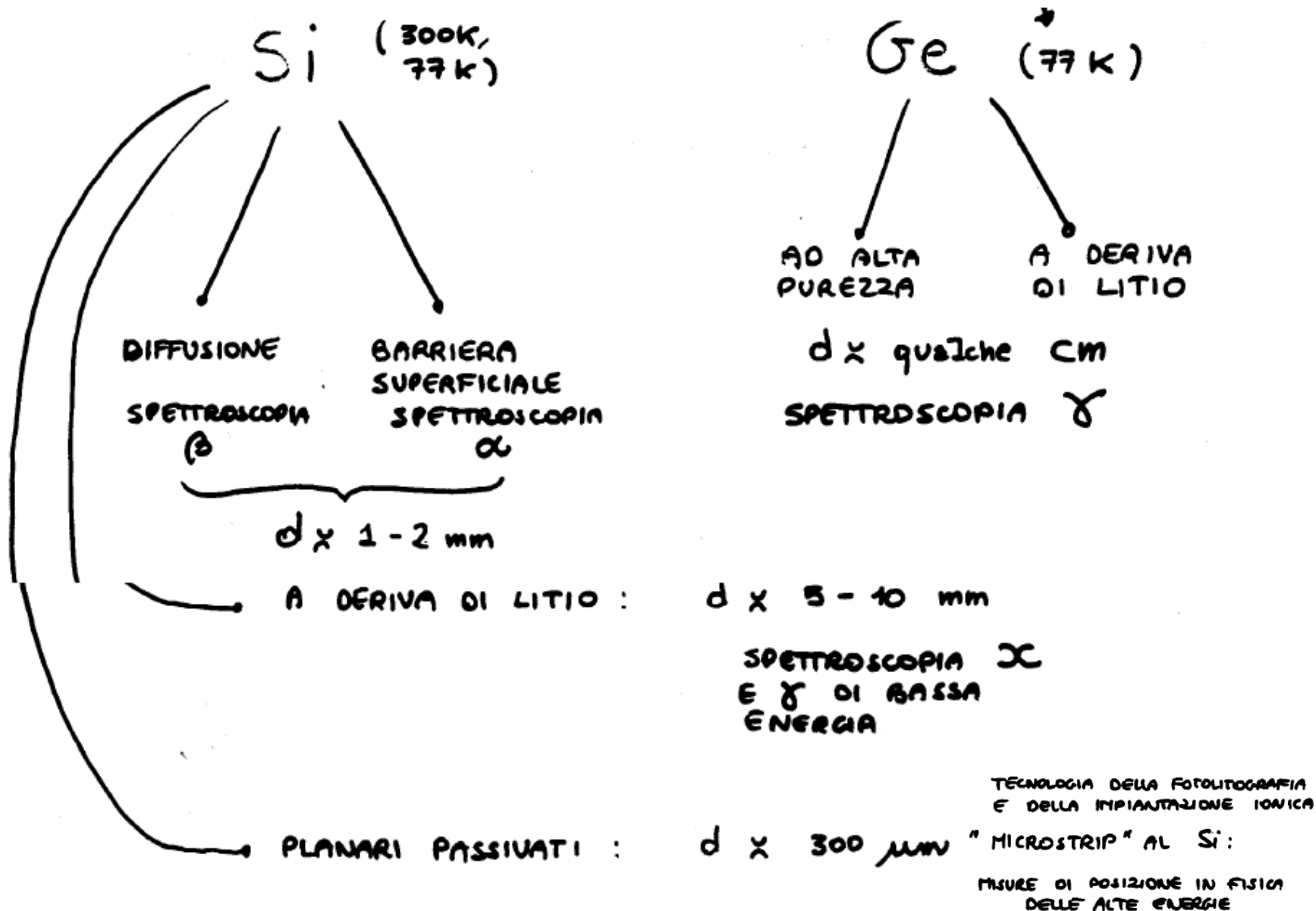
$$\tau_e \approx 2\varepsilon\rho = 10ns$$

$$\tau_h = \mu_e / \mu_h \tau_e \approx 3\tau_e$$

$$\rho = 5k\Omega \cdot cm$$

- Il silicio e' veloce!

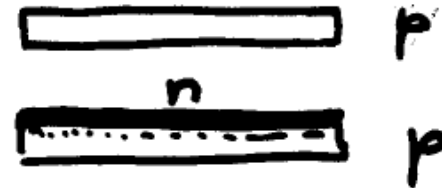
TIPI DI RIVELATORI A SEMICONDUCTORE



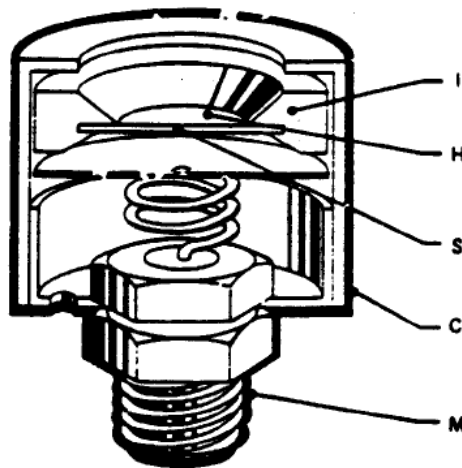
TIPI DI RIVELATORI A SEMICONDUCTORE

● A DIFFUSIONE.

- SI PARTE DA MATERIALE P
- SI DIFFONDE DA UN LATO DROGANTI DI TIPO N IN GRAN NUMERO
- LA REGIONE DI SVUOTAMENTO (1 - 2 mm) SI ESTENDE NELLA REGIONE P
- STRATO MORTO DI $\sim 2 \mu\text{m}$ DAL LATO DA CUI SI DIFFONDE



MALE PER α
BENE PER β



● A BARRIERA SUPERFICIALE

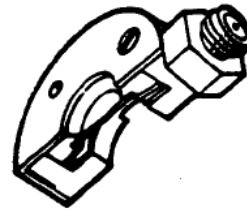


Figure 11-8 Construction and mounting of silicon junction detectors shown in cross-sectional view. (a) Surface barrier mount with coaxial connector (M) at rear. The silicon wafer (S) is mounted in a ceramic ring (I) with electrical contact made between either side of the junction and opposite metalized surfaces of the ring. The front surface is connected to the outer case (C) and grounded, whereas the back surface is connected to the center conductor of the coaxial connector. (b) Cutaway view of a transmission mount, in which both surfaces of the silicon wafer are accessible. The coaxial connector is placed at the edge of the ceramic ring. (Courtesy of EG & G ORTEC, Oak Ridge, TN.)

- SI PARTE DA MATERIALE N
- SI ATTACCA CHIMICAMENTE UNA SUPERFICIE

↳ ALTA DENSITÀ DI DIFETTI IN SUPERFICIE,
CHE FUNGONO DA "TRAPPOLE" PER
ELETTRONI E QUINDI DA DROGANTI DI
TIPO ACCETTORE

- SI DEPOSITA UNO STRATO SOTTILE DI ORO
SULLA SUPERFICIE "ATTACATA"

↳ STRATO MORTO TRASCURABILE,
OTTIMO PER SPETTROSCOPIA α

SPETTROSCOPIA α CON Si A BARRIERA SUPERFICIALE

$$\frac{dN}{dE} [e_{0g}]$$

$\Delta E_{FWHM} \approx 10 \text{ keV AL MEGLIO}$

$\Delta E_{FWHM} \approx 50 \text{ keV VALOR MEDIO}$

$\Delta E_{FWHM} \approx 3-4 \text{ keV LIMITE STATISTICO}$

CI SONO ALTRE CAUSE DI DETERIORAMENTO DELLA RISOLUZIONE

$$\Delta E \propto \sqrt{E}$$

$$\Delta E (1 \text{ MeV}) \approx 2 \text{ keV (FWHM)}$$

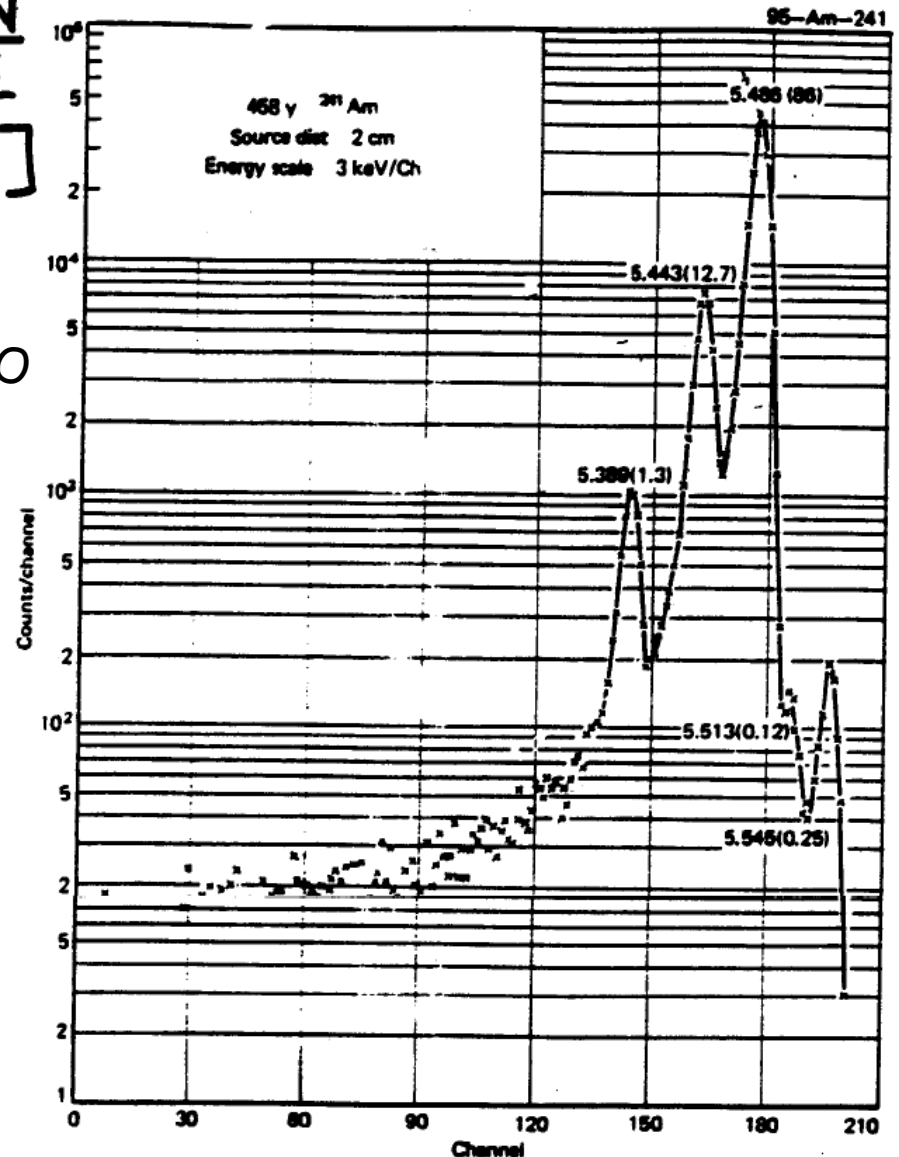
IL MIGLIOR RIVELATORE DI PARTICELLE
COME RISOLUZIONE ENERGETICA
IN QUESTO INTERVALLO DI ENERGIE

$$\sigma^2 = \sigma^2_{\text{POISSON}} + \sigma^2_{\text{RI}} + \sigma^2_{\text{EL}}$$

$F \approx 0.1$! INCOMPLETA RACCOLTA DELLE CARICHE

CONTRIBUTI ALLA RISOLUZIONE ENERGETICA

RUMORE DEI COMPONENTI ELETTRONICI

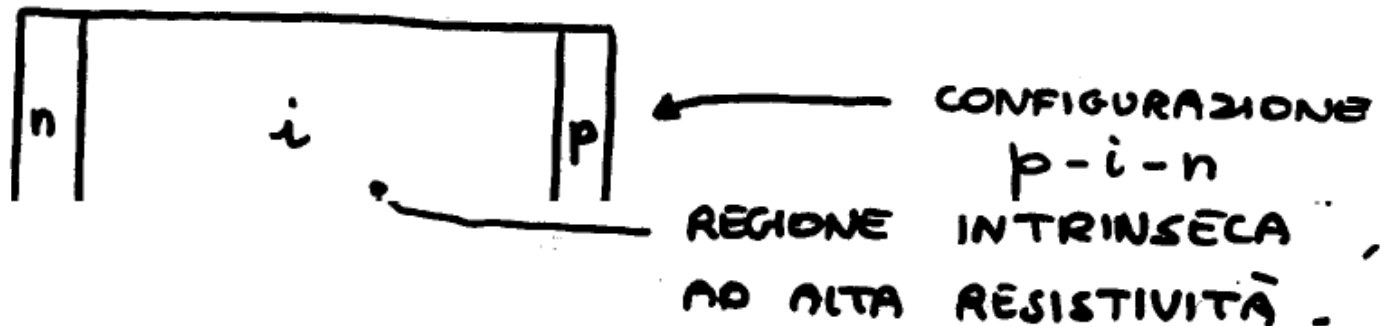


E

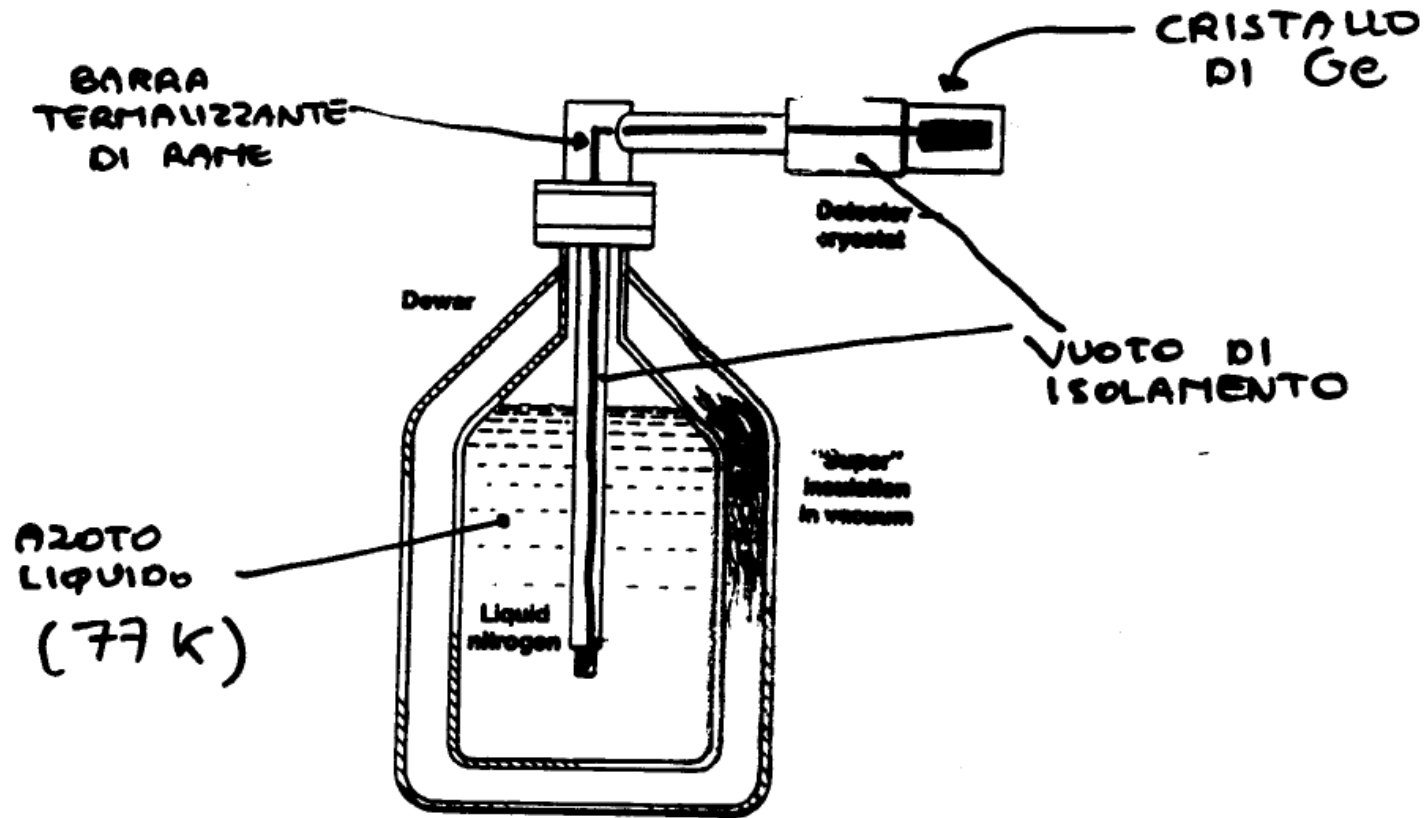
RIVELATORI HPGe PER SPETTROSCOPIA γ

- IL Ge NON PUÒ ESSERE USATO A TEMPERATURA AMBIENTE (CORRENTE DI FUGA TROPPO ELEVATA)
 - LAVORANDO A $T = 77\text{ K}$, SI RIESCONO A COSTRUIRE RIVELATORI DI GRANDI DIMENSIONI (ANCHE ALCUNE CENTINAIA DI cm^3) GRAZIE ALL'ELEVATA PUREZZA OTTENIBILE PER CRISTALLI SINGOLI DI Ge. $\sim 10^9$ atomi
- INOLTRE, $Z_{\text{Ge}} = 32$ (VS $Z_{\text{Si}} = 14$)
- IDEALE PER SPETTROSCOPIA γ AD ALTA RISOLUZIONE

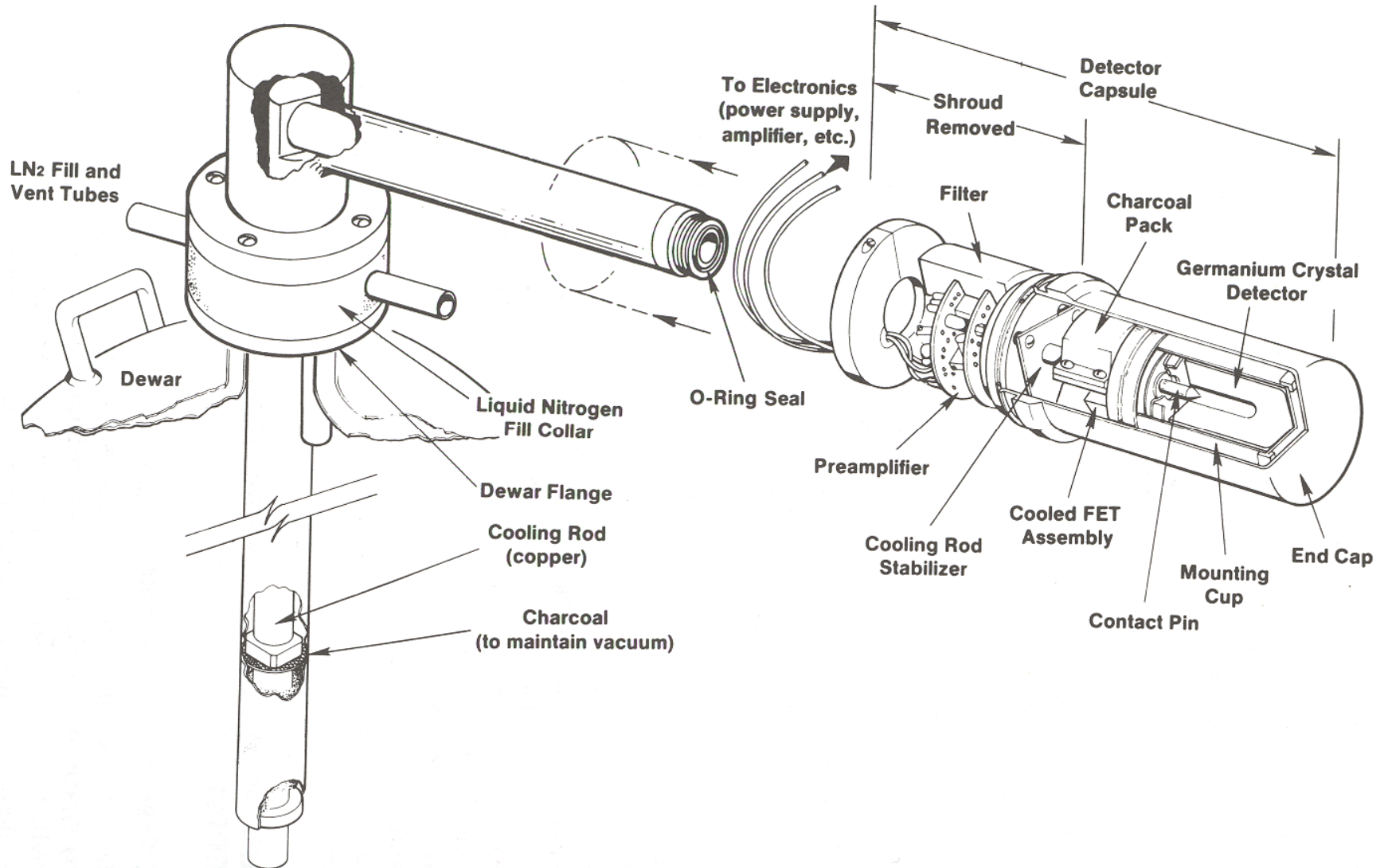
PER OTTENERE GRANDI REGIONI DI SVUOTAMENTO, SI OPERA COSÌ:



TIPICA CONFIGURAZIONE DI UN HPGe



DETTAGLIO CONFIGURAZIONE DI UN HPGe



CONFRONTO SPETTROMETRIA γ CON HPGe vs NaI

