

Particle Detectors

Lecture 17

05/05/17

a.a. 2016-2017

Emanuele Fiandrini

Rivelatori a stato solido

La giunzione p-n.

Abbiamo visto che occorre ridurre la carica libera nel volume attivo per ottenere un rapporto fra segnale e rumore favorevole (24000 coppie di segnale vs 1.5×10^{10} di coppie termiche) occorre svuotare di carica libera il volume attivo → **diodo in polarizzazione inversa**

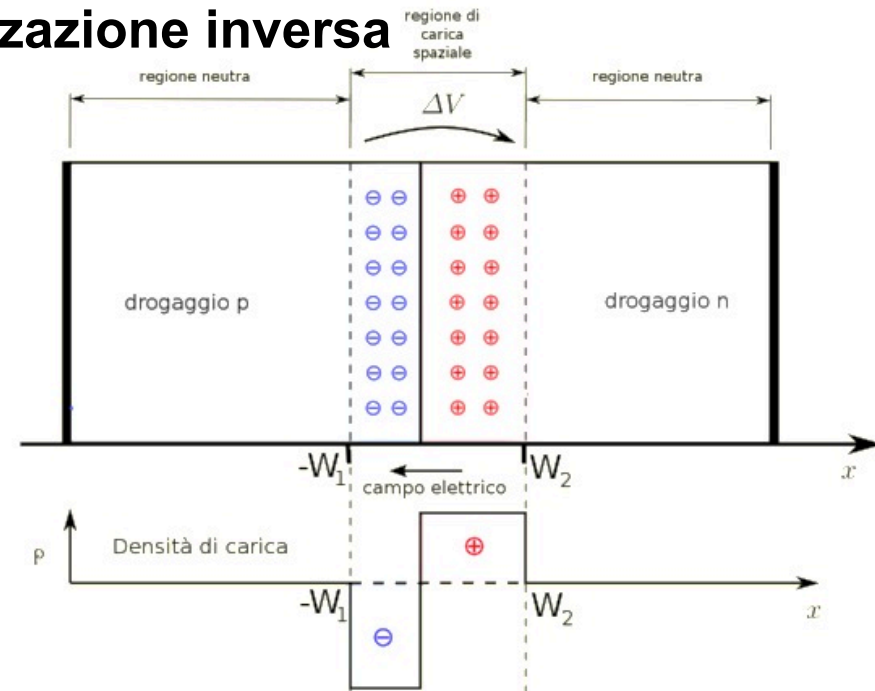
Date 2 regioni contigue di silicio
una di tipo **p** e l'altra di tipo **n**.

La giunzione e' costituita dall'interfaccia
tra la regione p ed n, in cui la densita'
di carica cambia bruscamente

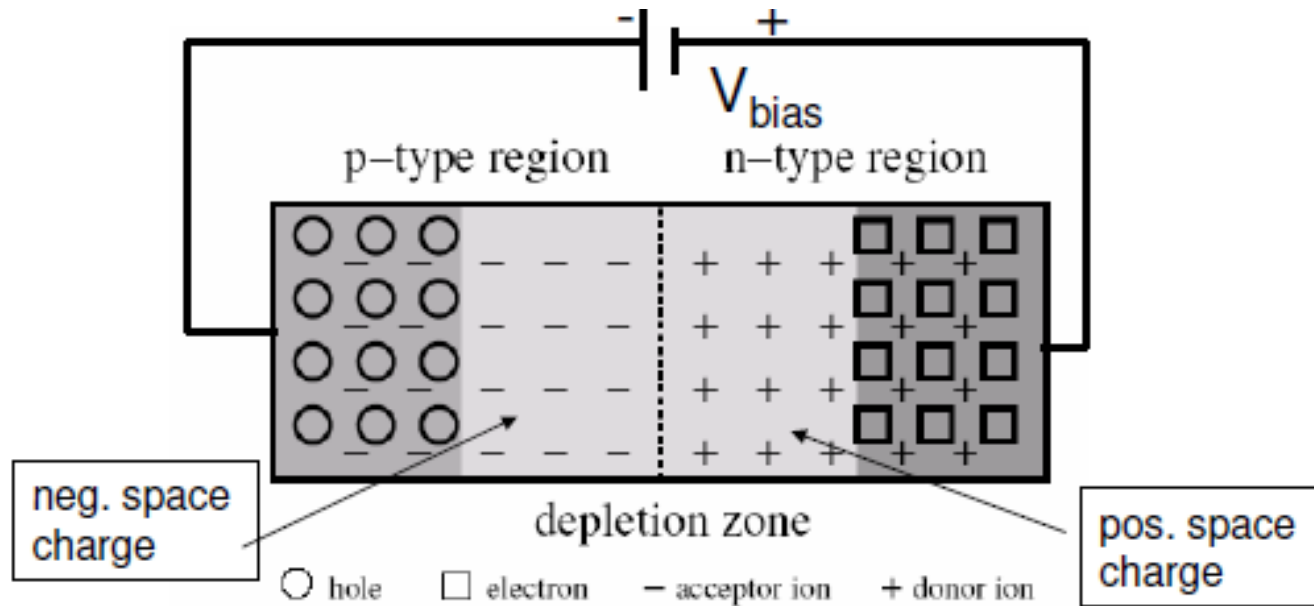
Valori tipici di drogaggio sono:

$10^{12}/\text{cm}^3$ (**n**) e $10^{15}/\text{cm}^3$ (**p**)

(molto minori che nei circuiti integrati e diodi o transistor,
nei quali la concentrazione è $\sim 10^{17(18)}/\text{cm}^3$)



P-N junction



electrons drift towards p-side, holes towards n-side → buildup of a potential.

Without an external potential applied, there will be a thermal flux of charge carriers at the junction: a flux of e^- from n to p region and h from p to n region. A space charge region forms due to fixed positive ions in the n region and fixed e^- in the p region. Net flux is = 0 when the built-up electric field, or the contact potential V_c due the space charge stops further diffusion

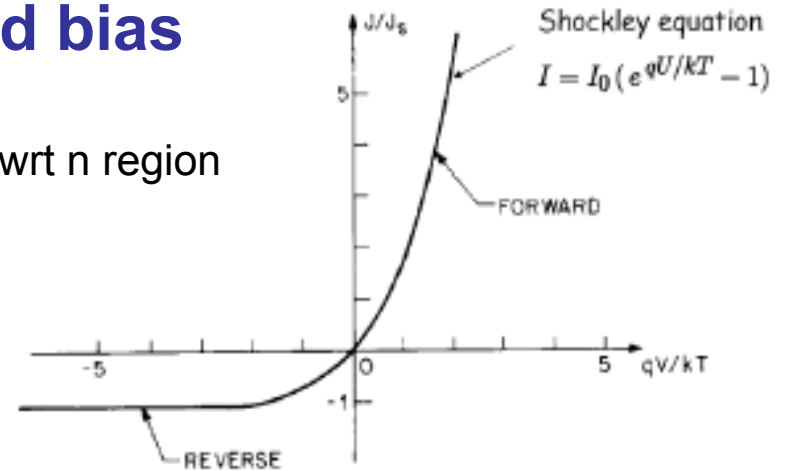
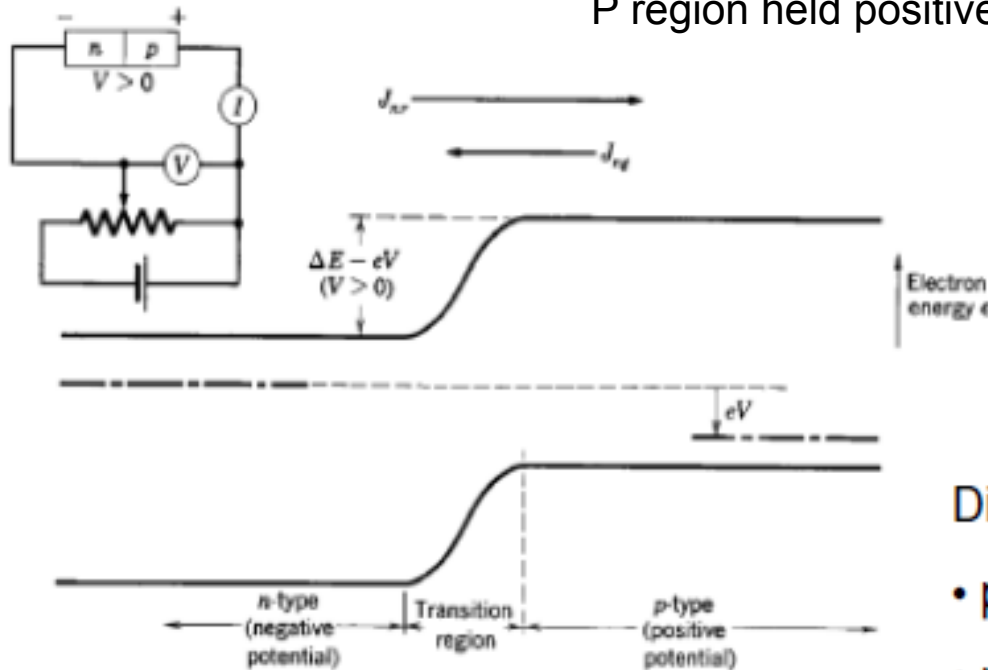
$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \approx 600 \text{ mV}$$

Correnti alla giunzione

- Per es. prendiamo gli elettroni. All'equilibrio, non c'è corrente netta.
- All'equilibrio, nella zona n ci sono cariche con energia termica sufficiente a superare la barriera di potenziale V_d ($n \sim \exp(-eV_d/2kT)$) e diffondere nella zona p, dove si ricombinano → flusso di ricomb. o di saturazione da n a p, J_{nr}
- Deve esserci flusso di cariche dalla zona p a quella n, generate termicamente nella zona p che diffondono attraverso la giunzione, J_{ng} .
- All'equilibrio $J_{ng} + J_{nr} = 0$
- Lo stesso argomento si applica alle lacune: $J_{pg} + J_{pr} = 0$
- Quando un pot. V esterno è applicato, l'altezza della barriera di pot alla giunzione diventa $V_d + V$

P-N junction in forward bias

P region held positive wrt n region



from Sze, Physics of Semiconductor Devices

Diode in Forward Bias

- positive potential at p-region
- negative potential an n-region

• The external voltage reduces the potential barrier.

→ electrons from the n-region can cross the barrier.

In tal caso il # di e- che supera la barriera e'
 $\propto \exp[-e(V_d - V)/kT] = (\text{cost.}) \exp[eV/kT]$, quindi
 la corrente di saturazione J_{nr} e $J_{pr} \propto \exp[eV/kT]$.

Per $V = 0$, $J_{pr} = J_{pg}$ e $J_{nr} = J_{ng}$

→ $J_{pr} = J_{pg} \exp[eV/kT]$ e $J_{nr} = J_{ng} \exp[eV/kT]$

La corrente di generazione e' indipendente dal
 pot $V \rightarrow$ la corrente totale e'

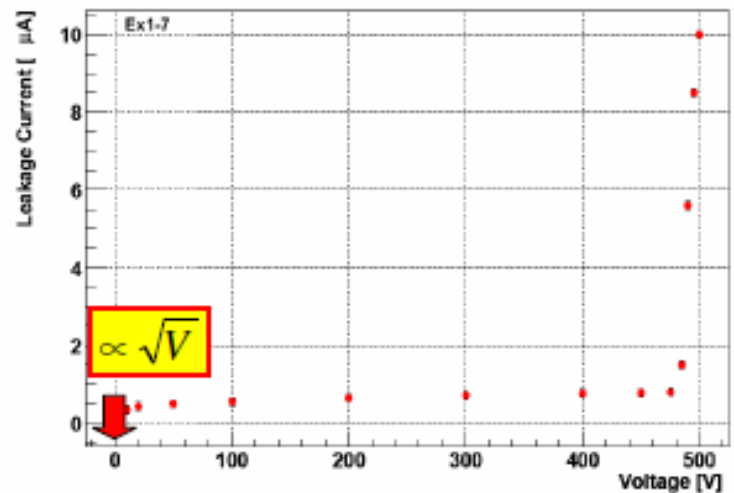
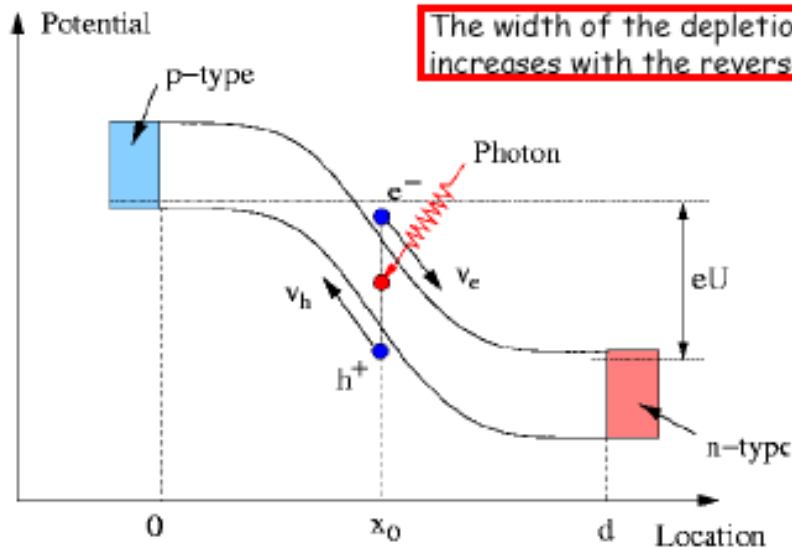
$$J_{\text{tot}} = (J_{pg} + J_{ng})(\exp[eV/kT] - 1)$$

P-N junction in reverse bias

N positive wrt p

- The external voltage increases the potential barrier
- The depletion zone can be used as detector, since it contains an electric field (and is depleted of free charges).

Leakage current: Thermal generation of e h pairs → temperature dependant



Break through:

Detector behaves like a conductor (charge avalanche)

Nella zona di carica spaziale non ci sono cariche libere di muoversi

Se n e' tenuto positivo rispetto a p, la barriera di potenziale cresce di $-eV \rightarrow$ le correnti di saturazione sono soppresse dall'exp, mentre quelle di generazione rimangono costanti. Quindi in condizioni di "reverse" bias"

$$J_{\text{tot}} = J_{\text{pg}} + J_{\text{ng}}$$

La zona di carica spaziale alla giunzione si allarga

Depth of the depletion region

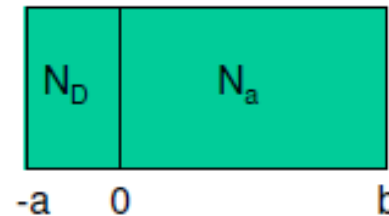
Poisson-Equation for the potential $U(x)$ (1-dimensional for simplicity):

$$\frac{d^2U(x)}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0}$$

with $E_x = -dU / dx \rightarrow \frac{dE_x(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0}$

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

Asymmetric double layer with N_D, N_A density of donor- and acceptor impurities.



Assumption: $N_D \gg N_A$ and $a < b$

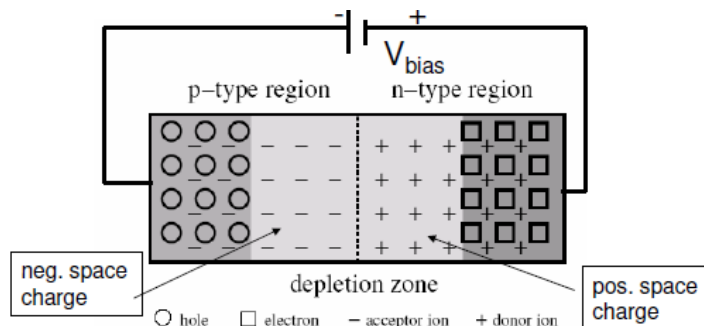
Boundary conditions for electric field:

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

1. Integration of Poisson equation with above boundary conditions



$$dU / dx = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon\epsilon_0}(x+a) & \text{für } -a < x \leq 0 \\ +\frac{eN_A}{\epsilon\epsilon_0}(x-b) & \text{für } 0 < x \leq b \end{cases}$$



Depth of the depletion region

Boundary condition for the potential:

$$U(-a) = 0 \quad \text{und} \quad U(b) = -U_0 \quad \leftarrow \text{applied voltage}$$

2. Integration:

$$U(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{2\epsilon\epsilon_0}(x+a)^2 & \text{für } -a < x \leq 0 \\ +\frac{eN_A}{2\epsilon\epsilon_0}(x-b)^2 - U_0 & \text{für } 0 < x \leq b \end{cases}$$

Require continuity of potential and its derivative at the junction @ $x=0$

$$b(a+b) = \frac{2\epsilon\epsilon_0 U_0}{eN_A}$$

$$b \approx \left(\frac{2\epsilon V}{qN_d \left(1 + \frac{N_d}{N_a} \right)} \right)^{1/2}$$

$$a \approx \left(\frac{2\epsilon V}{qN_a \left(1 + \frac{N_a}{N_d} \right)} \right)^{1/2}$$

The highest field strength is then at $x=0$:

$$E_x(0) = \sqrt{\frac{2eN_A U_0}{\epsilon_0 \epsilon}} = \frac{2U_0}{d}$$

Rivelatori a stato solido

In assenza di potenziale esterno, l'altezza della barriera di potenziale di contatto V_d è :

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \approx 600 \text{ mV}$$

la zona di svuotamento è in genere piccola, circa 10 μm , con i valori tipici di doping

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon(V_d + V)}{qN_d \left(1 + \frac{N_d}{N_a}\right)} \right)^{1/2}$$

Se viene applicato un potenziale V , la zona di svuotamento diventa:

Se $N_a \gg N_d$ $x_n \gg x_p$ la zona di svuotamento è quasi tutta nella regione n (meno drogata):

$$x_p = \left(\frac{2\varepsilon(V_d + V)}{qN_a \left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right)} \right)^{1/2}$$

$$d \approx x_n \approx \left(\frac{2\varepsilon(V_d + V)}{qN_d} \right)^{1/2}$$

$$= (2\varepsilon\rho\mu V)^{1/2}$$

La tensione a cui lo spessore svuotato $e' = a$ quello del rivelatore, d , e' il "depletion voltage"

$$V_{dep} \approx \frac{d^2}{2\varepsilon\rho\mu}$$

Il potenziale di contatto V_d e' di solito $\ll V$ e puo' essere trascurato

In tal caso tutto il volume del diodo diventa "attivo", cioe' capace di dare un segnale utile.

→ **Fissa il punto di lavoro $V > V_{dep}$**
NB: si noti che piu' alta e' ρ , minore e' la tensione necessaria per svuotare il rivelatore

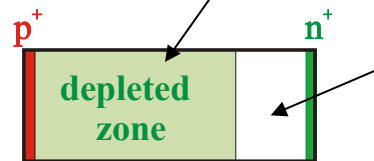
Valori tipici delle tensioni di svuotamento 50-100 V per 300 μm di spessore

Reverse biased abrupt p⁺ n junction

Poisson's equation

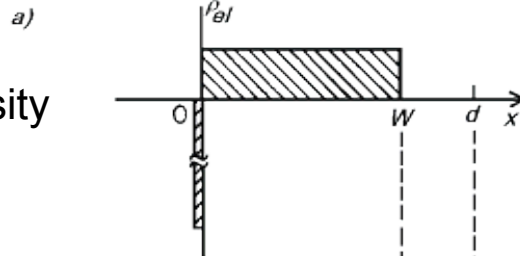
$$-\frac{d^2}{dx^2}\phi(x) = \frac{q_0}{\epsilon\epsilon_0} \cdot N_{eff}$$

Positive space charge, $N_{eff}=[P]$
(ionized Phosphorus atoms)

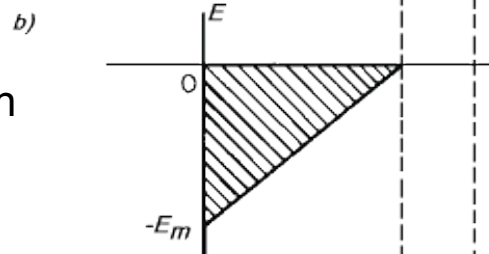


neutral bulk
(no electric field)

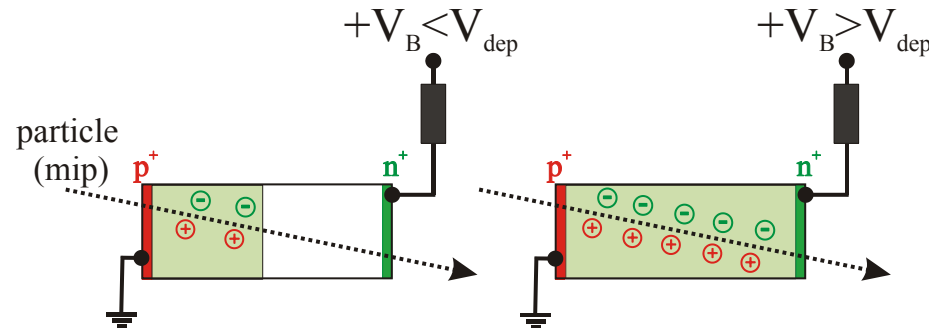
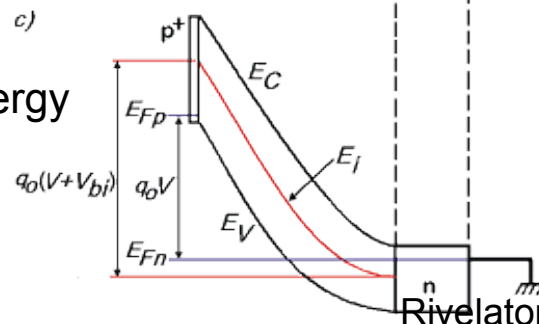
Electrical
charge density



Electrical
field strength



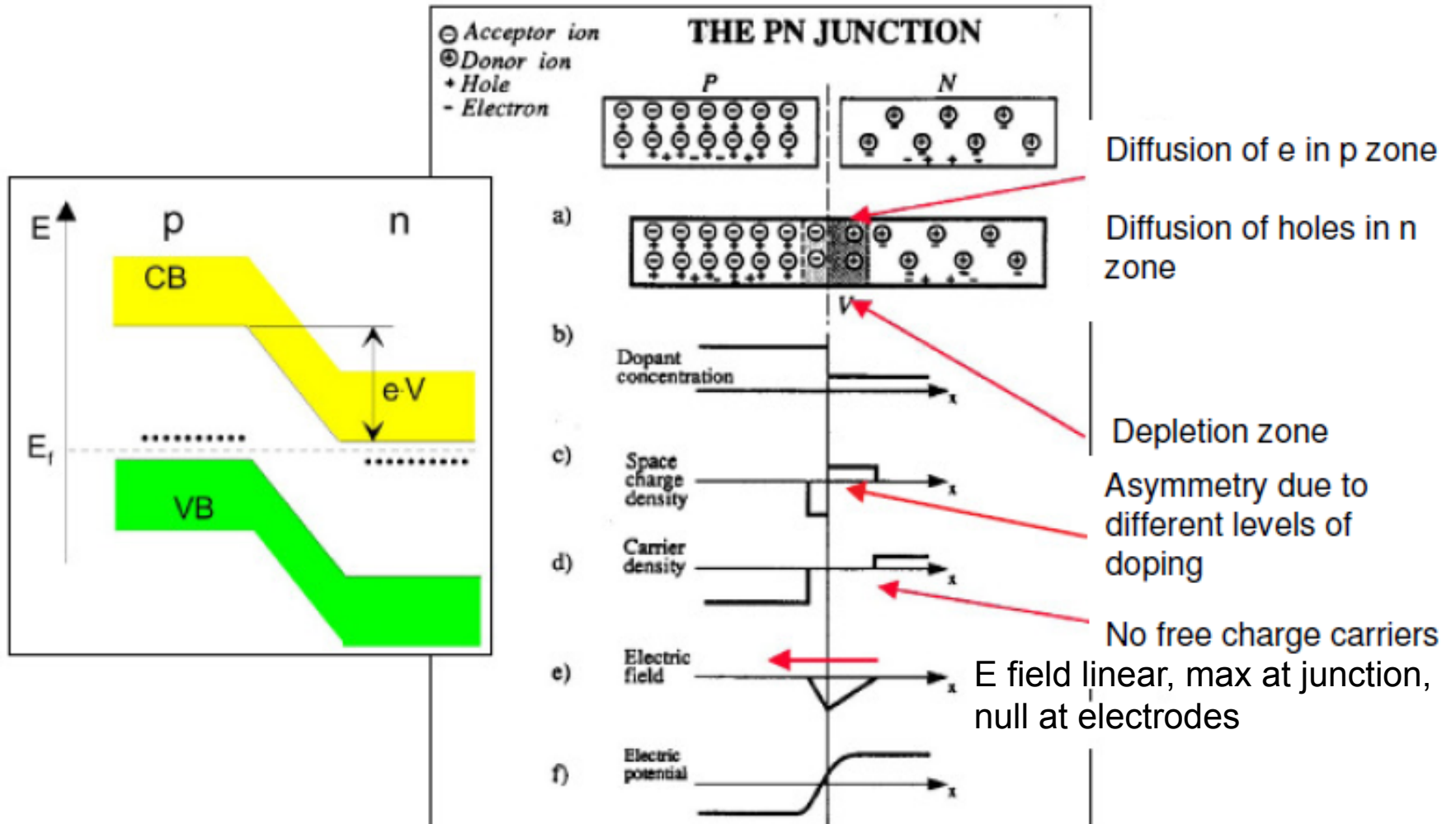
Electron
potential energy



The charge liberated in the undepleted region is not collected since there is no electric field applied in that region and the free charge is much greater.

Full charge collection only for $V_B > V_{dep}$!

P-N junction: overview



Potential quadratically increasing in the space charge region between 0 at p and $+V$ at n side

Rivelatori a stato solido

Capacità

Siccome abbiamo una carica associata alla giunzione dipendente dal voltaggio possiamo parlare di una **capacità di carica spaziale**:

$$C_j = \frac{dQ}{dV_B} = \frac{dQ}{dw} \frac{dw}{dV_B}$$

Abbiamo chiamato **w** la profondità della zona di svuotamento.

L' incremento di carica **dQ** si ha ai lati della giunzione a causa dell'allargamento di **w** **dw** causato dalla crescita **dV_B** del voltaggio di bias **V_B**. ➔

$$\begin{aligned} dQ &= qN_d dw \\ \frac{dw}{dV_B} &= \frac{dx_n}{dV_B} = \sqrt{\frac{q \epsilon N_a \cdot N_d}{2(N_a + N_d) V_B}} \\ \Rightarrow C_j &= \sqrt{\frac{\epsilon}{2 \mu \rho V_B}} \end{aligned}$$

Capacità per unità di area.

L'ordine di grandezza di **C_j** è ~150÷200 pF/cm² per **V_B**~100V

Se **A** è l'area avremo **C_j**=(ε/w)A

Rivelatori a stato solido

- In condizioni di reverse bias, la corrente NON e' zero.
- Due contributi: correnti di generazione e correnti di diffusione

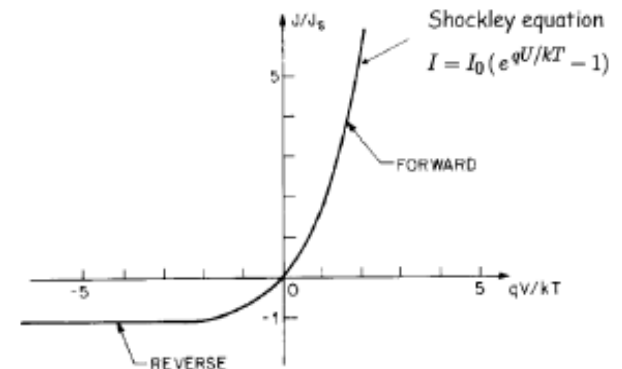
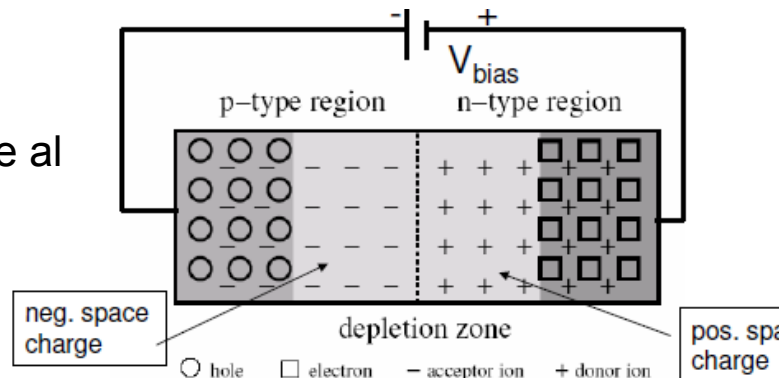
$j_{diff} = q(n_p/\tau_n)L_n + q(p_n/\tau_p)L_p$ (L = lunghezza di diffusione). Queste correnti di diffusione sono dovute alle cariche generate vicino alla zona di svuotamento e che diffondono nella zona di svuotamento stessa. Se τ_p e τ_n sono le vite medie dei p nella regione n e degli n nella regione p le lunghezze di diffusione saranno $L_n = (D_n\tau_n)^{1/2}$ e $L_p = (D_p\tau_p)^{1/2}$, essendo D la costante di diffusione.

$j_{gen} = (1/2)(n_i/\tau_o)d$ corrente dovuta alla carica generata nella zona di svuotamento. τ_o = vita media dei portatori minoritari nella zona di svuotamento: dipende da difetti e impurita' del reticolo che ricombinano/intrappolano la carica. Questa corrente è proporzionale a d , lo spessore svuotato, che a sua volta è proporzionale a $(V_B)^{1/2}$. n_i dipende fortemente dalla temperatura (raddoppia ogni 8°) → mantenere il silicio a temperatura costante.

Il contributo delle due correnti dipende dal materiale: nel Ge domina la corrente di diffusione, mentre nel Si domina la corrente di generazione.

Valori tipici nel Si, 35 nA/cm²

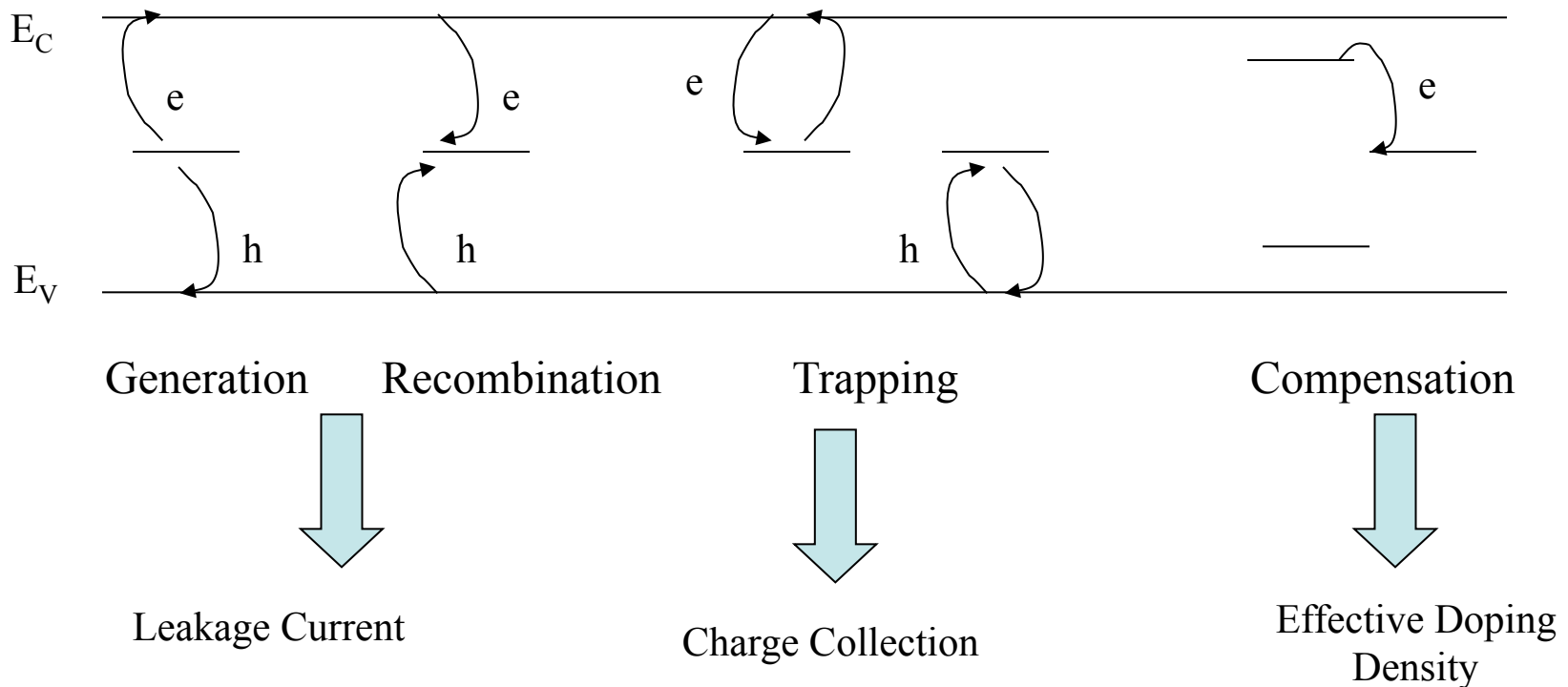
La corrente del rivelatore contribuisce al rumore dell'apparato



Effects of Defects

I difetti creano livelli di energia nella gap, che oltre a generare corrente di leakage, possono intrappolare elettroni e lacune per un tempo lungo rispetto a quello di raccolta oppure possono ricombinare coppie catturate dalla stessa trappola → **inefficienze di raccolta di carica**.

Fisicamente sono creati da impurita' per sostituzione, interstiziale, dislocamento di piani reticolari, cioe' da tutti quei fattori che "distorcono" il potenziale periodico "ideale" del reticolo del semiconduttore...p. es irraggiamento



La statistica di questi processi e' descritta da quella di Shockley Read Hall (che non facciamo)

Rivelatori a stato solido

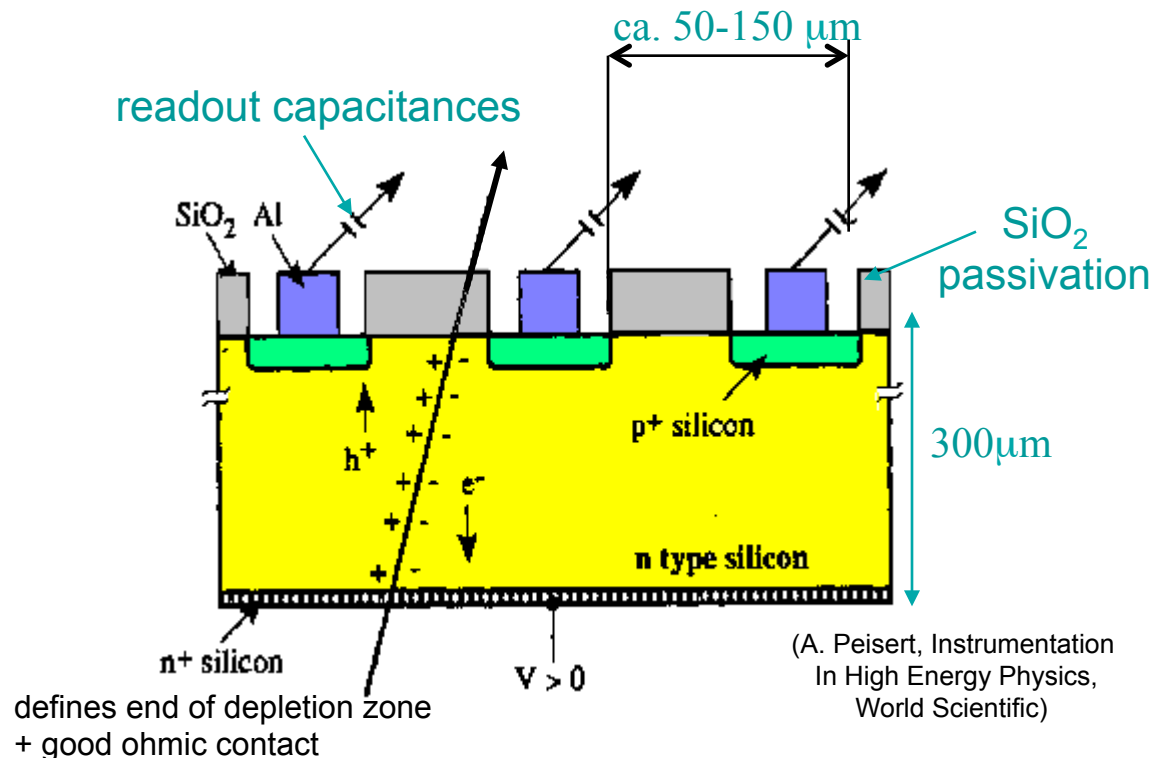
- ❑ Polarizzando inversamente il diodo (cioè applicando una $V_B \sim 100V$ dello stesso segno di V_d) → la sottile zona di carica spaziale si estende su tutto il diodo → diodo completamente svuotato.
 $d \sim x_n \sim (2\varepsilon V_B / q N_d)^{1/2}$ ed in termini della resistività ρ $d = (2\varepsilon V_B \rho \mu)^{1/2}$
- ❑ Il deposito di energia nella zona completamente svuotata, dovuto al passaggio della particella carica, crea delle coppie libere e-lacuna.
- ❑ Sotto l'influenza del campo elettrico, gli elettroni derivano verso il lato n, le lacune verso il lato p → si ha una corrente rivelabile
- ❑ la parte p serve :
 - ❖ per poter svuotare la parte n e quindi può essere molto sottile
 - ❖ per raccogliere le lacune che si sono formate

Rivelatori a stato solido

Possiamo usare la zona di carica spaziale svuotato come camera di ionizzazione. **Segmentando una o entrambe le faccie possiamo misurare la coordinata del punto di passaggio della particella ionizzante.**

Larghezza tipica microstrip 15 μm

Passo tipico 50-100 μm (da confrontare con quello delle camere a deriva e TPC, 1-2 mm)

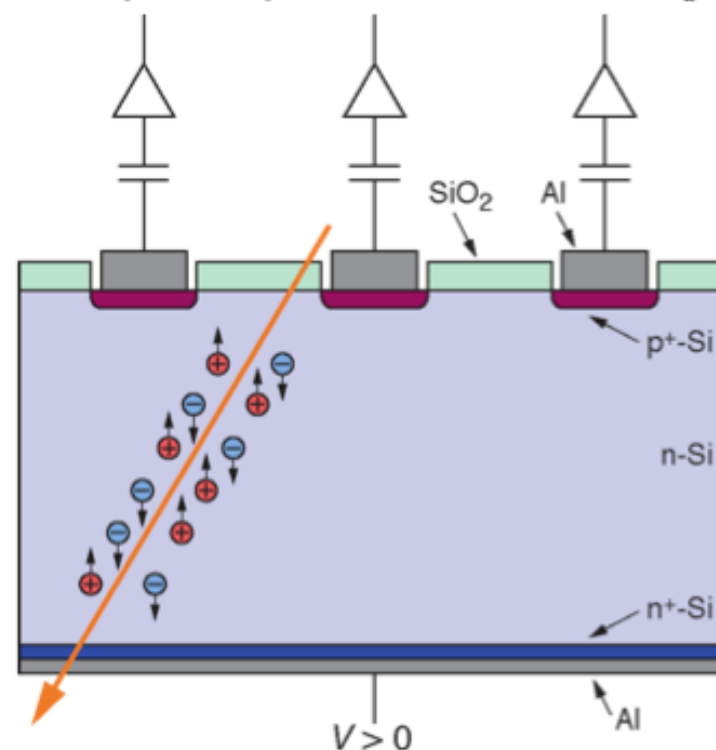


Rivelatori a stato solido

Through going charged particles create e^-h^+ pairs in the depletion zone (about 30.000 pairs in standard detector thickness). These charges drift to the electrodes. The drift (current) creates the signal which is amplified by an amplifier connected to each strip. From the signals on the individual strips the position of the through going particle is deduced.

A typical n-type Si strip detector:

- ★ p⁺n junction:
 $N_a \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_d \approx 1-5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- ★ n-type bulk: $\rho > 2 \text{ k}\Omega\text{cm}$
→ thickness 300 μm
- ★ Operating voltage < 200 V.
- ★ n⁺ layer on backplane to improve ohmic contact
- ★ Aluminum metallization



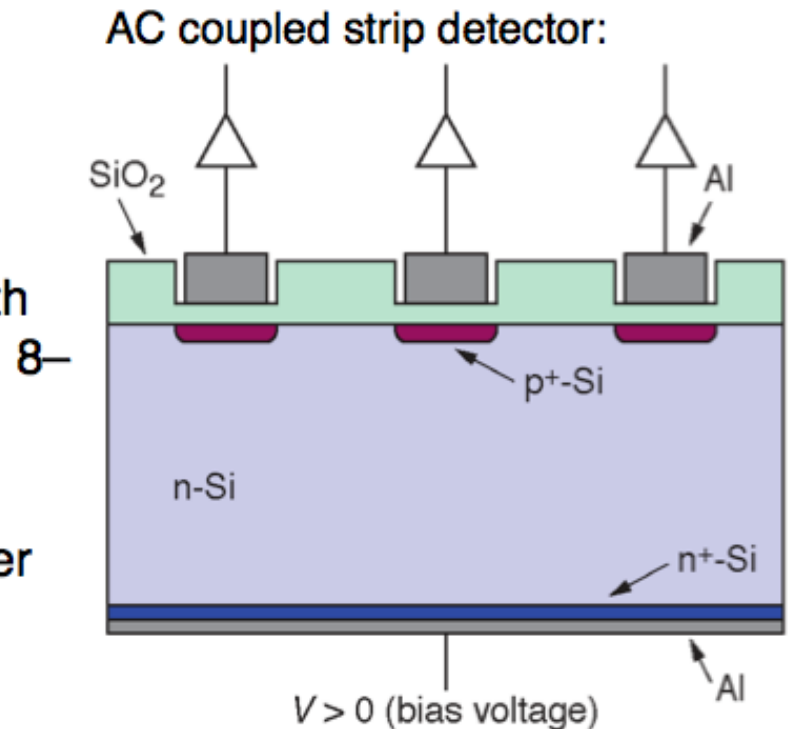
AC Coupling

La corrente delle strip va disaccoppiata dall'ingresso del circuito di lettura poiche' saturerebbe l'amplificatore.

Si inserisce un condensatore fra la strip e il circuito esterno, Puo' essere discreto o integrato

AC coupling blocks leakage current from the amplifier.

- ★ Integration of coupling capacitances in standard planar process.
- ★ Deposition of SiO_2 with a thickness of **100–200 nm** between p+ and aluminum strip
- ★ Depending on oxide thickness and strip width the capacitances are in the range of 32 pF/cm.
- ★ Problems are shorts through the dielectric (pinholes). Usually avoided by a second layer of Si_3N_4 .



Several methods to connect the bias voltage: polysilicon resistor, punch through bias, FOXFET bias.

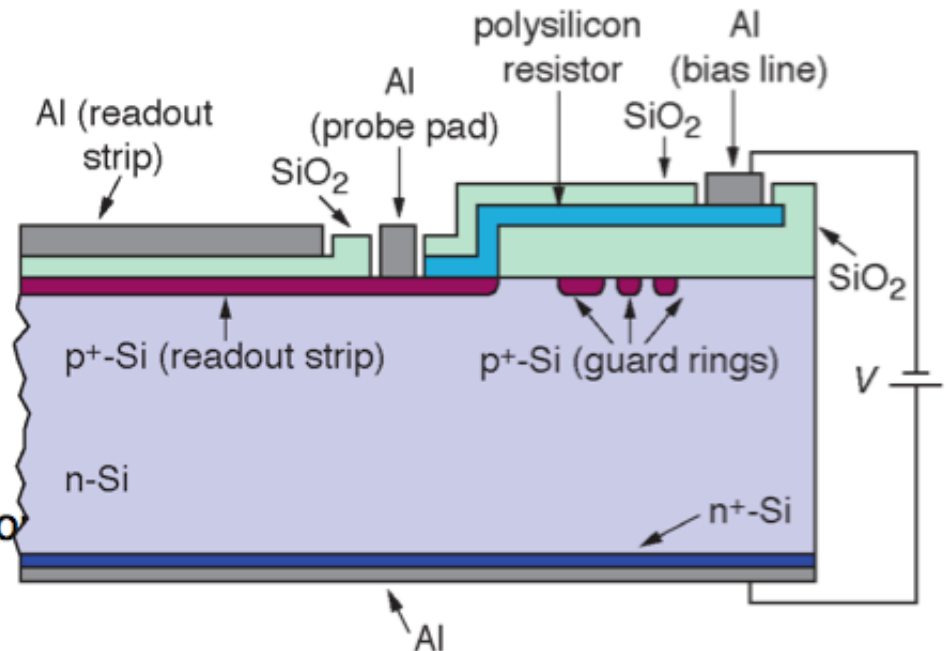
Alimentazione del detector (bias)

- Ciascuna strip va tenuta a tensione V (che puo' essere massa, per esempio sulla faccia di giunzione)
- La densita' di strip e' molto alta e le strip sono molto piccole (10 μm x qualche cm)
- Occorre una "linea" di alimentazione per ciascuna strip
- Non e' pensabile usare un "filo" per ogni strip
- Soluzione: linea di alimentazione (o bias) integrata nel rivelatore

Polysilicon Bias

- ★ Deposition of polycrystalline silicon between p⁺ implants and a common bias line.
- ★ Sheet resistance of up to $R_s \approx 250 \text{ k}\Omega/\square$. Depending on width and length a resistor of up to $R \approx 20 \text{ M}\Omega$ is achieved ($R = R_s \cdot \text{length}/\text{width}$).
- ★ To achieve high resistor values winding poly structures are deposited.
- ★ Drawback: Additional production steps and photo lithographic masks required.

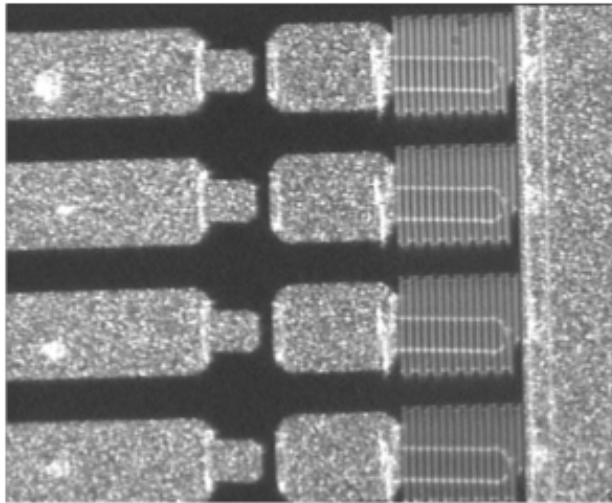
Cut through an AC coupled strip detector with integrated poly resistor



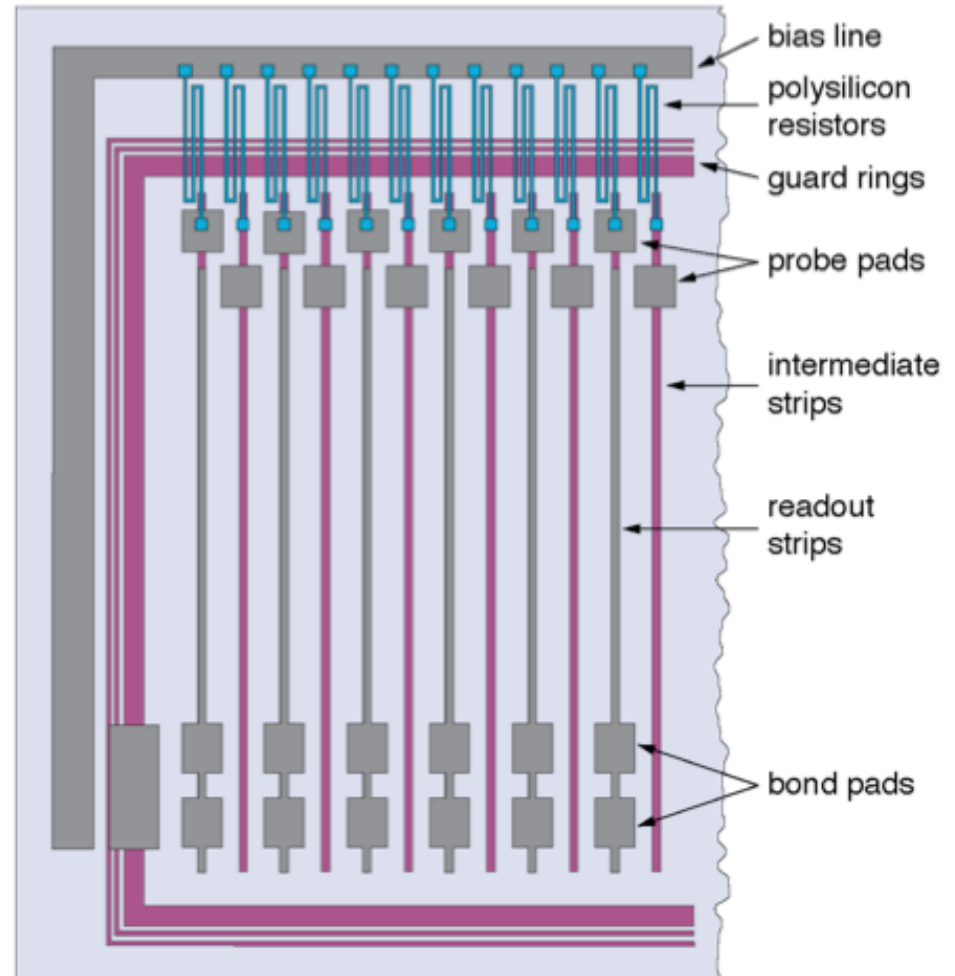
Polysilicon bias

Top view of a strip detector with polysilicon resistors:

CMS-Microstrip-Detektor: Close view of area with polysilicon resistors, probe pads, strip ends.

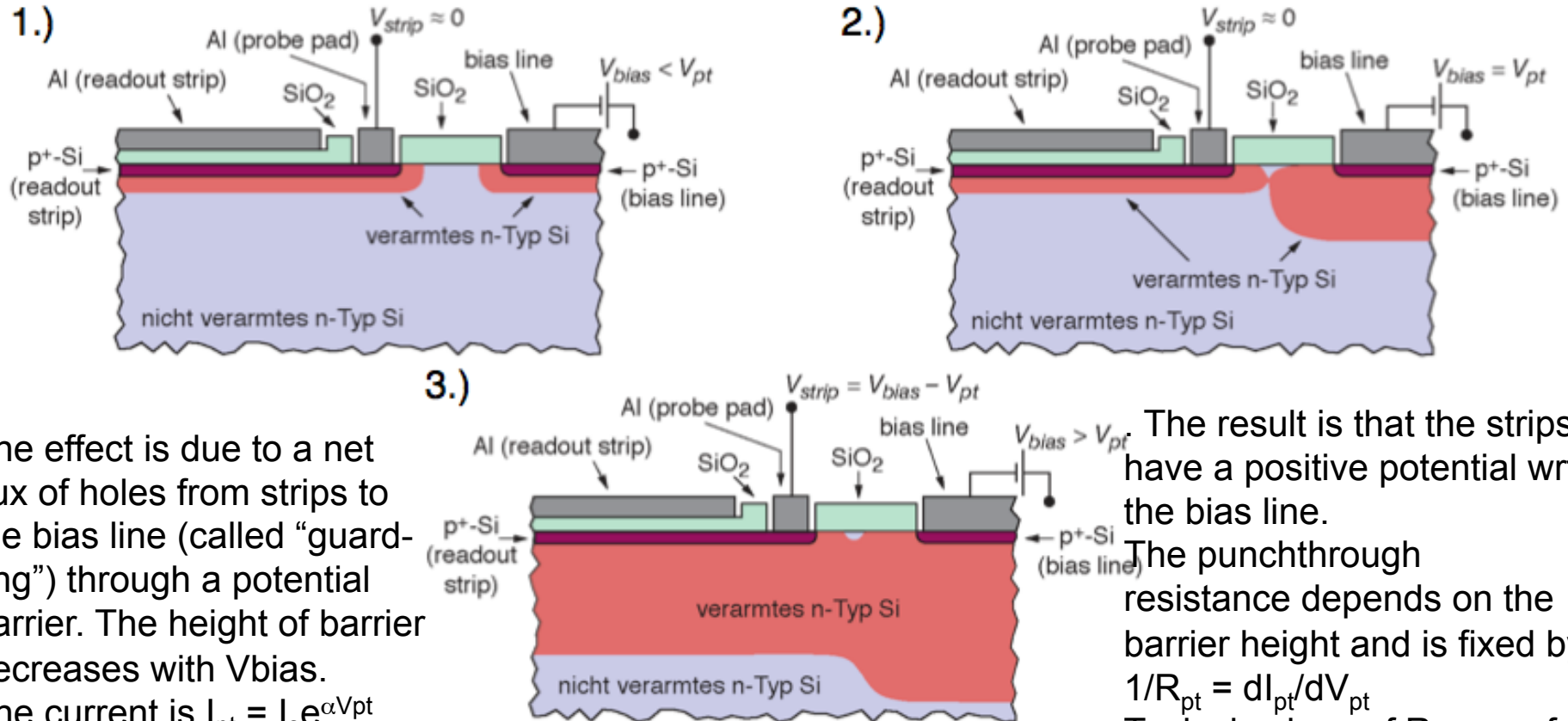


CMS Collaboration, HEPHY Vienna



Punch through bias

Punch through effect: Figures show the increase of the depletion zone with increasing bias voltage (V_{pt} = punch through voltage).



The effect is due to a net flux of holes from strips to the bias line (called “guard-ring”) through a potential barrier. The height of barrier decreases with V_{bias} . The current is $I_{pt} = I_s e^{\alpha V_{pt}}$

The result is that the strips have a positive potential wrt the bias line.

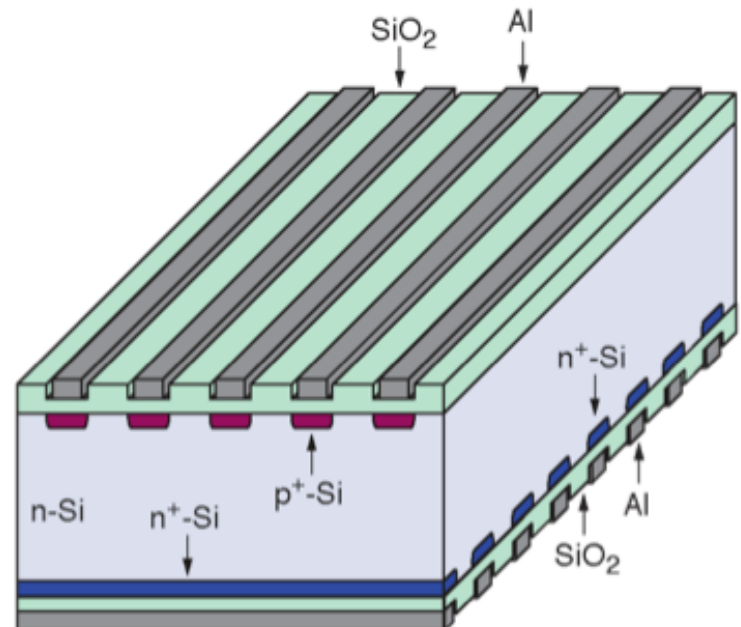
The punchthrough resistance depends on the barrier height and is fixed by $1/R_{pt} = dI_{pt}/dV_{pt}$. Typical values of R_{pt} are of O(1-10 GOhm)

Advantage: No additional production steps required.

silici doppia faccia

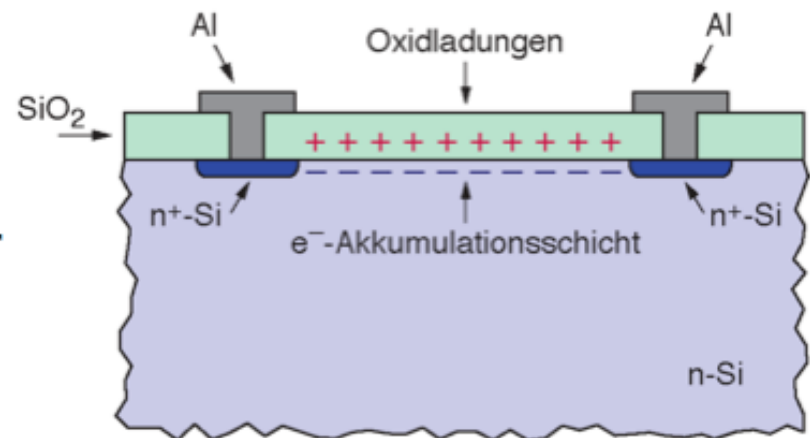
- ★ Single sided strip detector measures only one coordinate. To measure second coordinate requires second detector layer.
- ★ Double sided strip detector measures two coordinates in one detector layer (minimizes material).
- ★ In n-type detector the n^+ backside becomes segmented, e.g. strips orthogonal to p^+ strips.
- ★ Drawback: Production, handling, tests are more complicated and hence double sided detector are expensive.

Scheme of a double sided strip detector (biasing structures not shown):



Silici doppia faccia

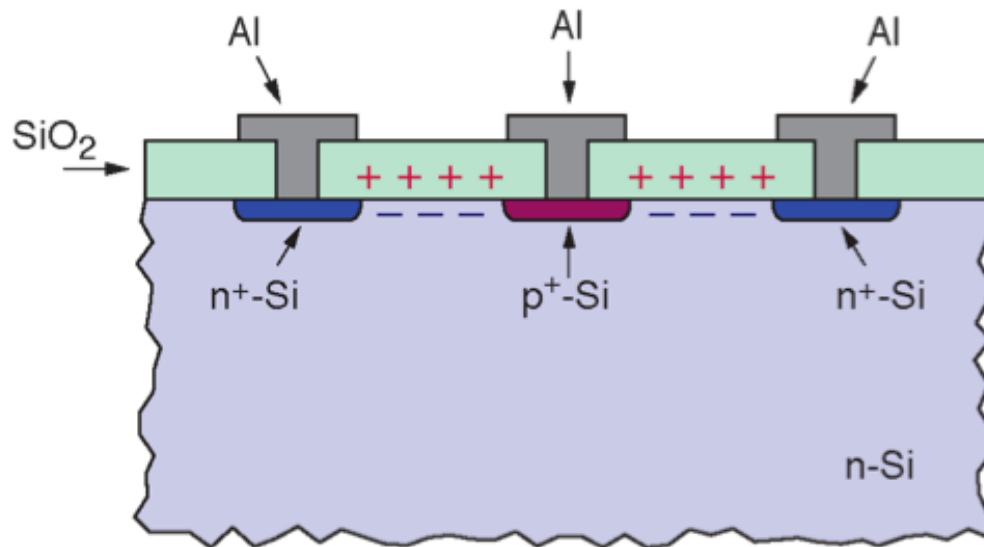
- ★ Problem with n^+ segmentation: Static, positive oxide charges in the Si-SiO₂ interface.
- These positive charges attract electrons. The electrons form an accumulation layer underneath the oxide.
- n^+ strips are no longer isolated from each other (resistance $\approx k\Omega$).
- Charges generated by through going particle spread over many strips.
- **No position measurement possible.**
- ★ Solution: Interrupt accumulation layer using p^+ -stops, p^+ -spray or field plates.



Positive oxide charges cause electron accumulation layer.

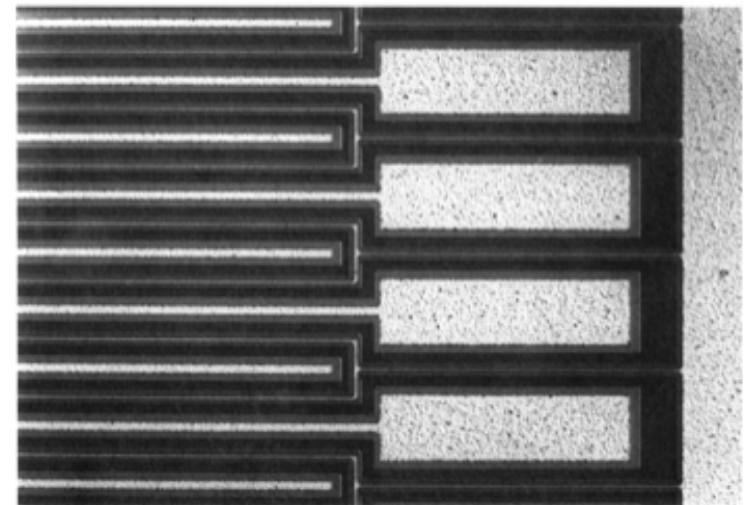
Silici doppia faccia

- ★ p^+ -implants (**p^+ -stops, blocking electrodes**) between n^+ -strips interrupt the electron accumulation layer.
- Interstrip resistance reach again $G\Omega$.



A. Peisert, *Silicon Microstrip Detectors*,
DELPHI 92-143 MVX 2, CERN, 1992

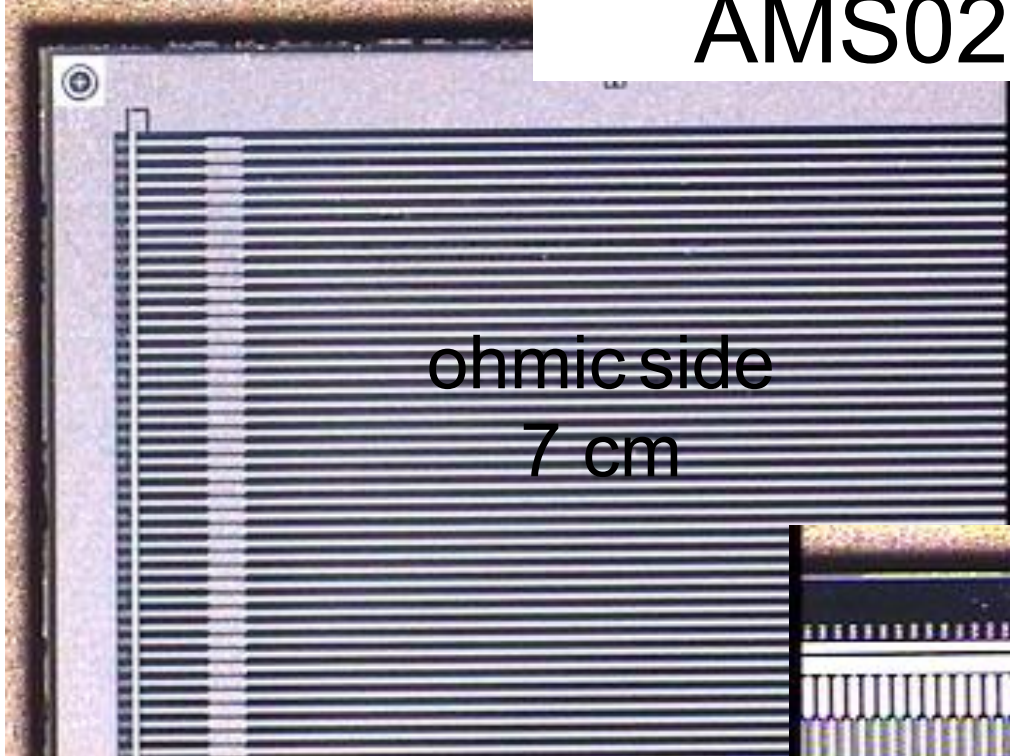
Picture showing the n^+ -strips and the p^+ -stop structure:



J. Kemmer and G. Lutz, *New Structures for Position Sensitive Semiconductor Detectors*,
Nucl. Instr. Meth. A **273**, 588 (1988)

AMS02 silicon detector

- 1264 p⁺ strip junctions on one side (junction side) with geometric pitch 55 μm
- 384 n⁺ (ohmic side) perpendicular to the p⁺ strips with geometric pitch 104 μm



ohmic side
7 cm

The basic units of the tracker are 300 μm -thick, n-doped, high resistivity $7 \times 4 \text{ cm}^2$ silicon sensors. 2500 pieces have been produced for the tracker assembly

I silici del tracciatore di AMS02 sono alimentati con punch through sulla faccia p e con surface through su quella n



Bending plane

junction side
4 cm

The strips are metallized with Al for with pads for ultrasonic bonding.

The strip width is 12 μm on P side and 40 μm on N side



110 μ

The sensors junctions operate over-depleted in reverse bias voltage regime to suppress the leakage current (noise source).

The operation bias voltage is 75 V



104 μ

Rivelatori a stato solido

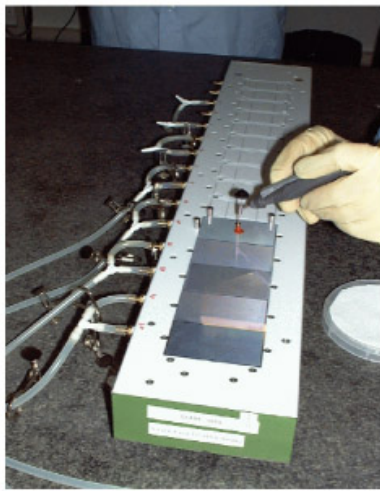
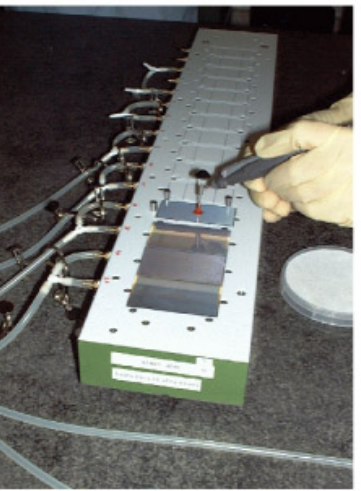
Risoluzione spaziale intrinseca (di singolo punto)

Dipende da:

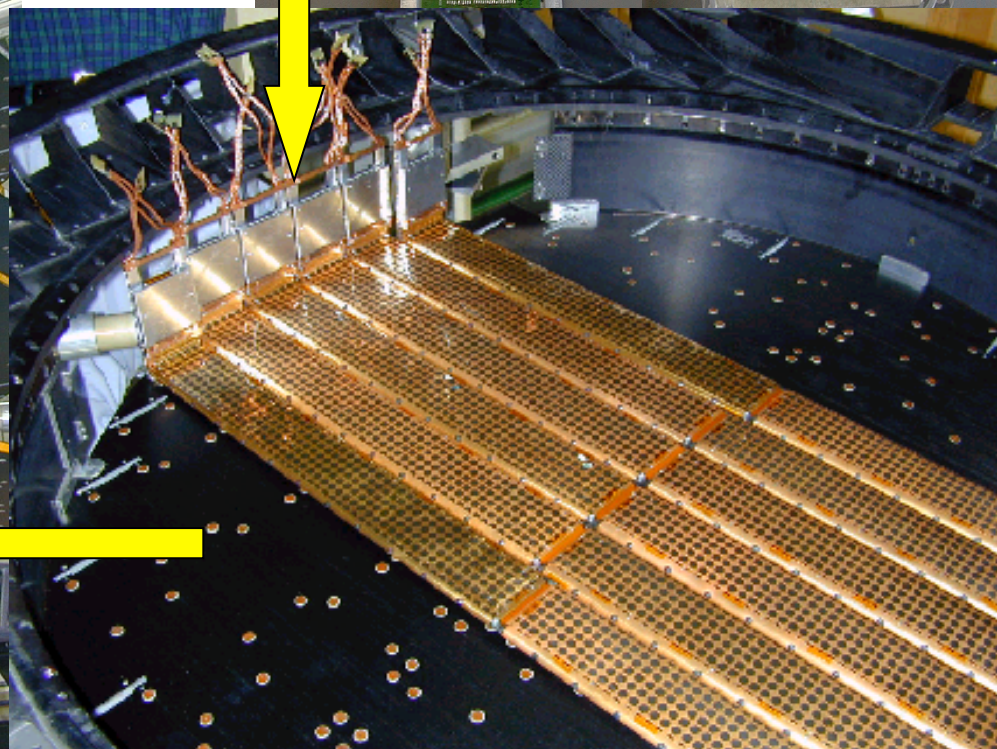
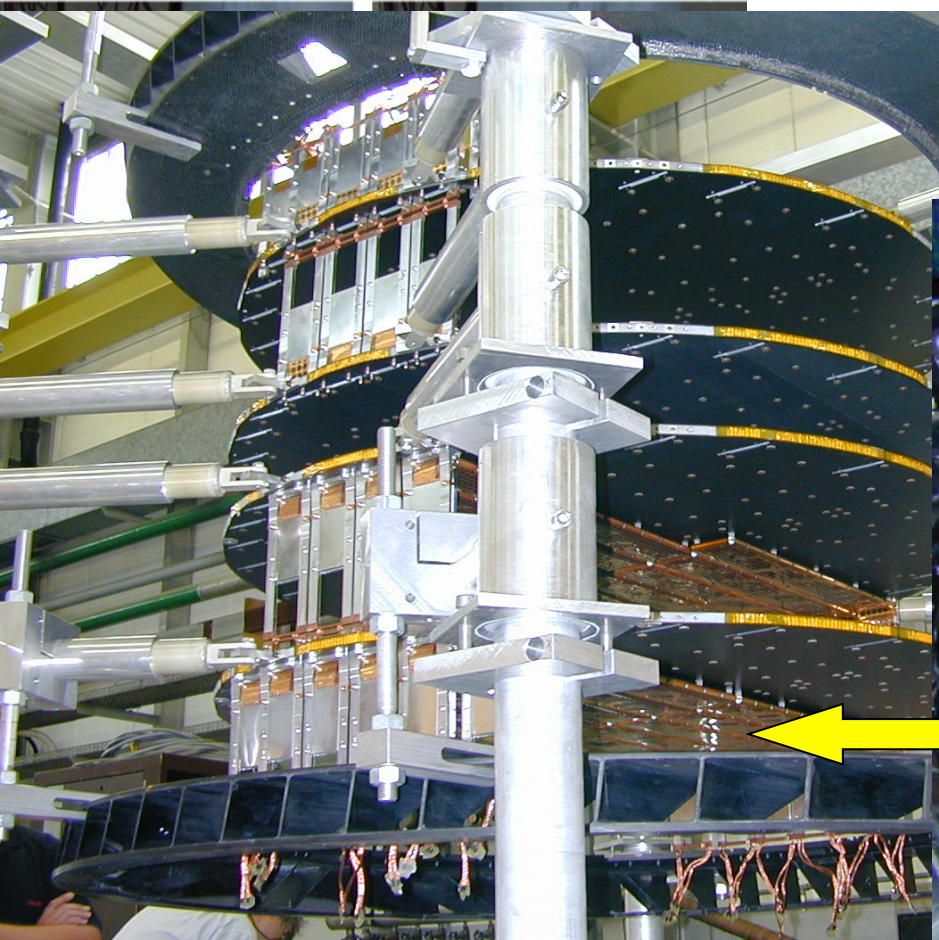
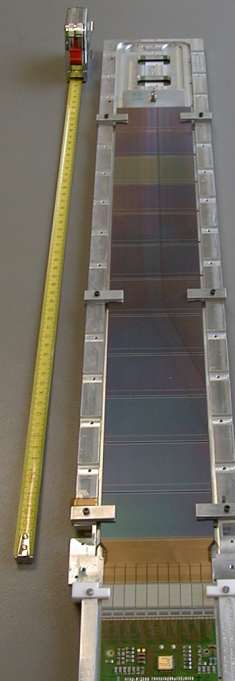
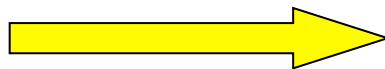
- ❖ **Processi fisici** quali le fluttuazioni della perdita di energia, la diffusione dei portatori di carica.
- ❖ **Fattori esterni** quali il numero di strip, il modo di lettura, il rumore dell'apparato (o meglio S/N)

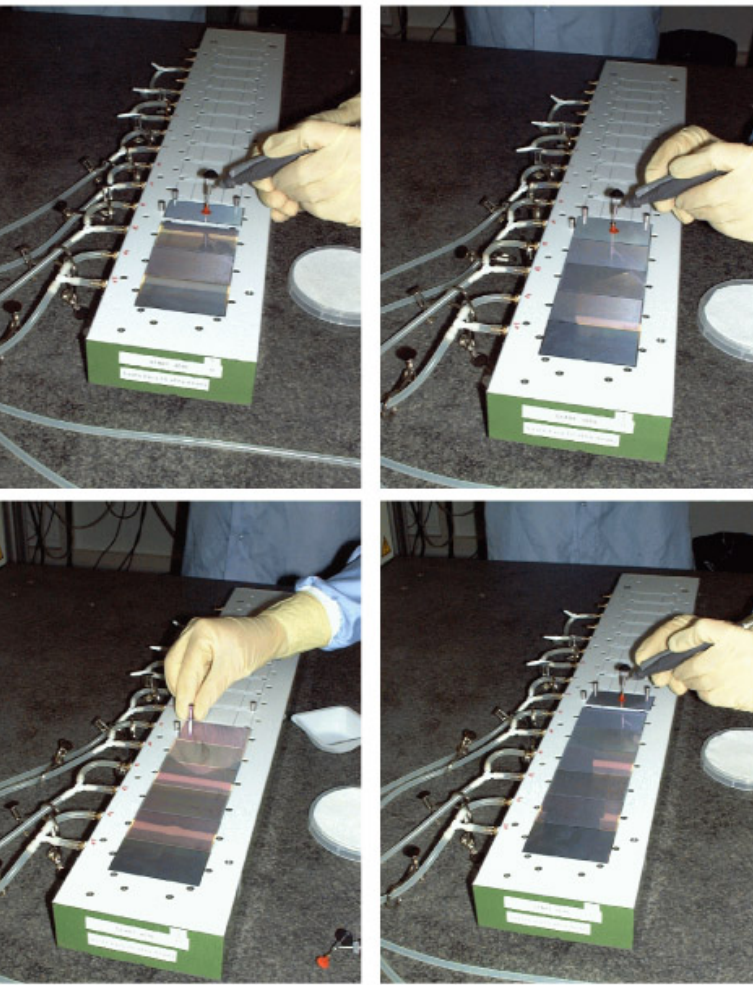
Si possono raggiungere precisioni fino a $\sim 3 \mu\text{m}$.

La risoluzione spaziale "totale" dipende in maniera cruciale dall'allineamento relativo dei differenti moduli che costituiscono l'apparato tracciante → necessarie misure continue di posizione relativa dei rivelatori



The tracker assembly





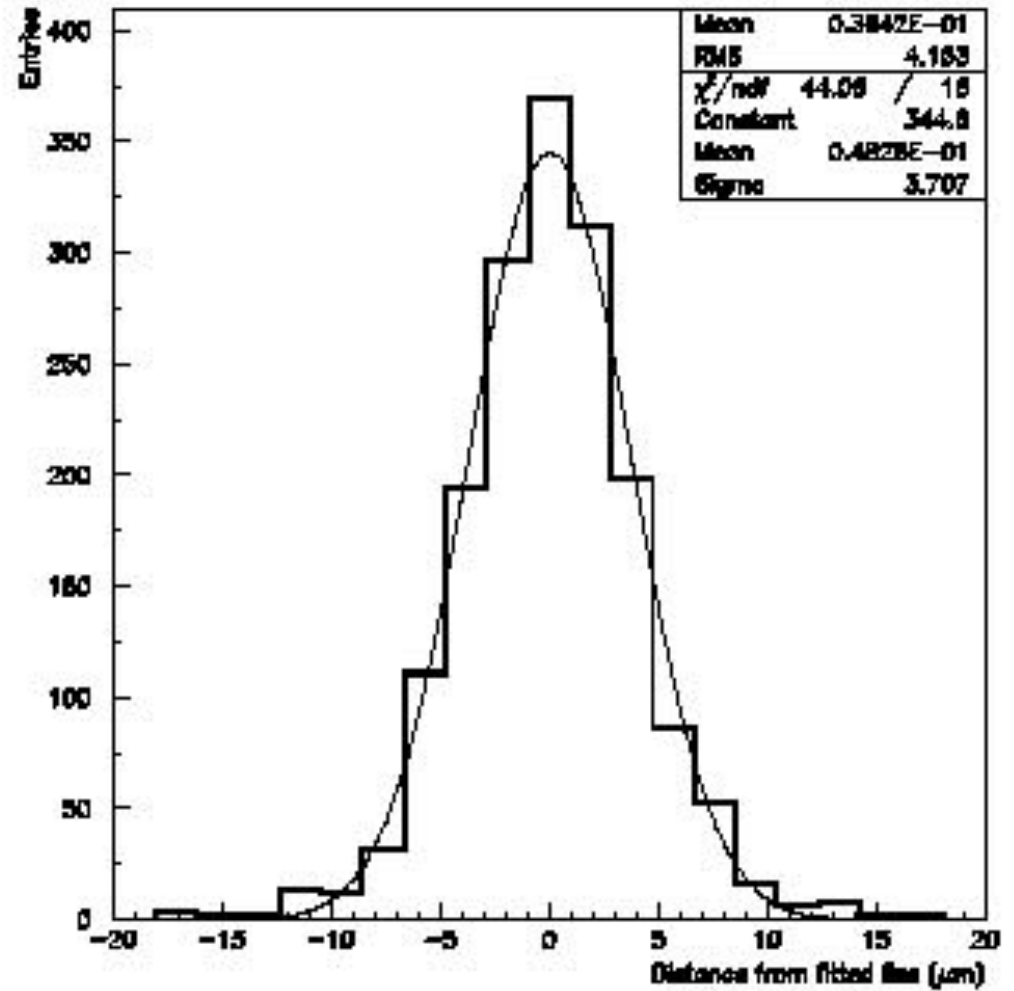
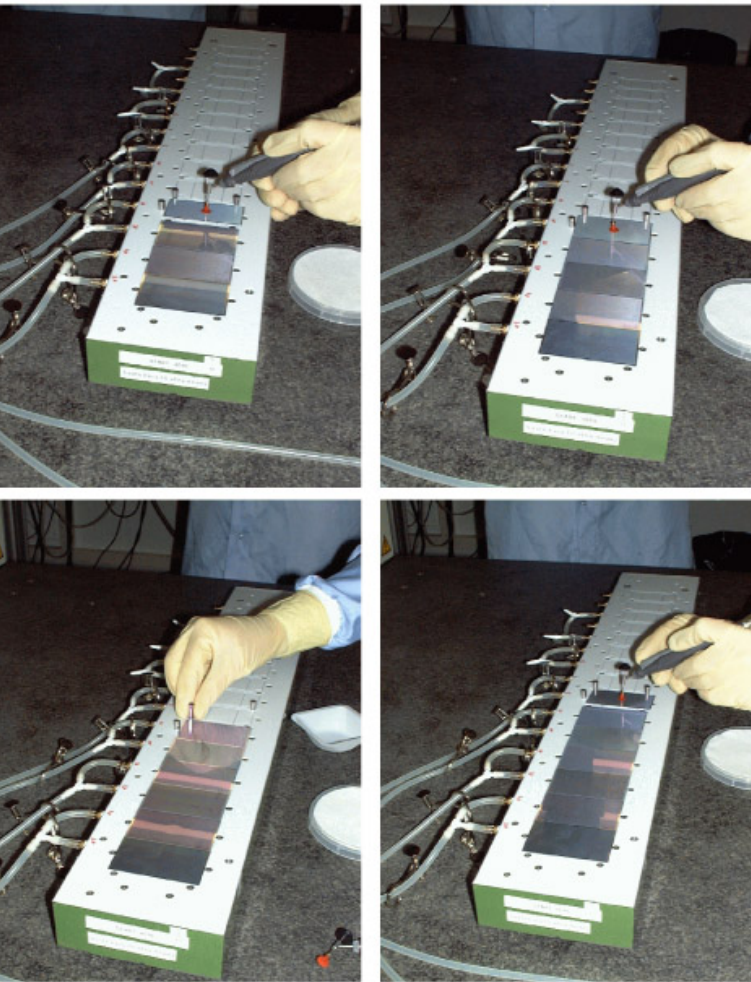
The fundamental unit of the tracker is a ‘**ladder**’: a set of mechanically and electrically connected silicon sensors.

To reach the highest position resolution, it is necessary to align the single sensors to a precision of few microns over a length up to 60 cm → special high precision jigs have been built to assemble the sensors.

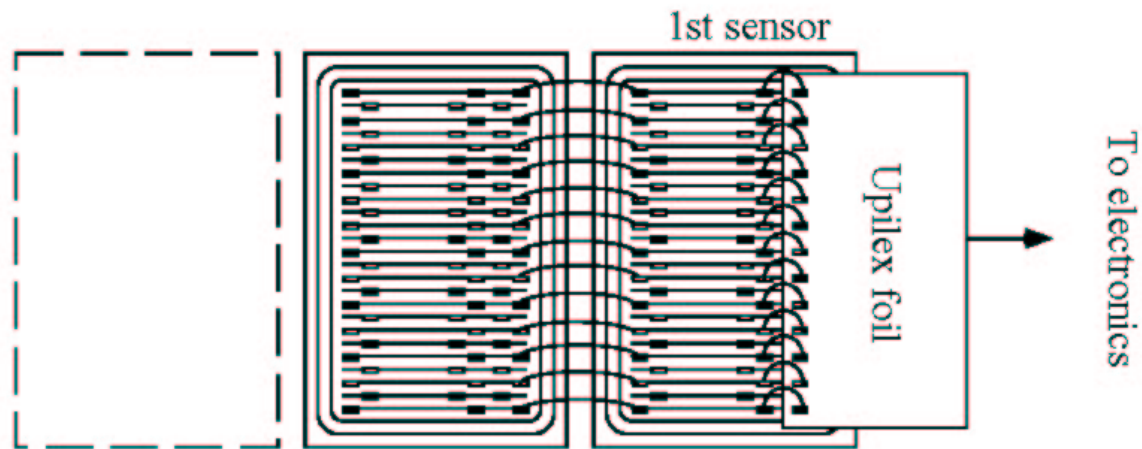
The tolerance on the sensors dimensions is less than 5 μm and the distance between 2 adjacent sensors is about 20 μm .

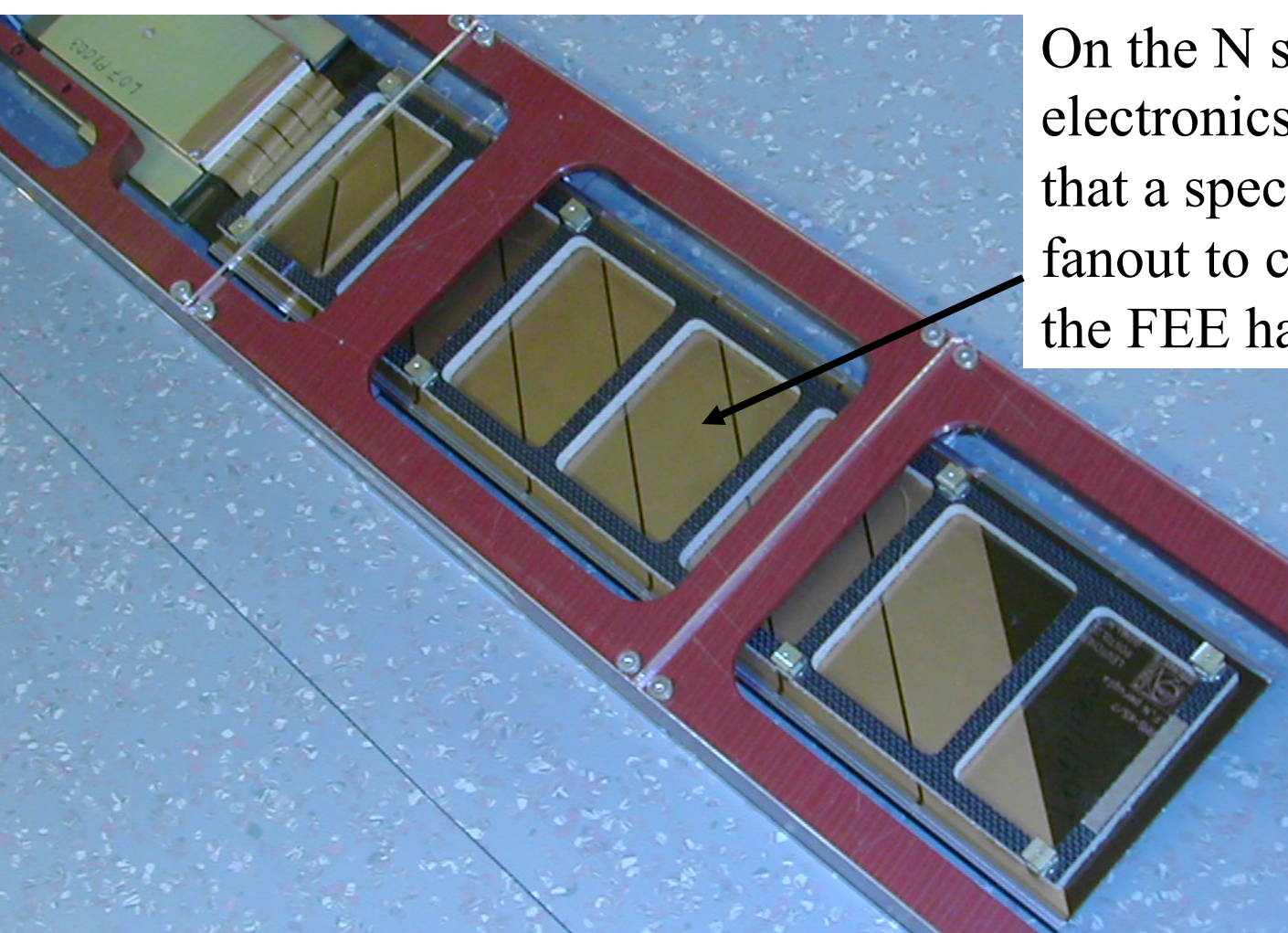
The final precision on alignment is better than 4 μm

The ladder assembly



To connect electrically all the sensors in a ladder, all the strips on the P side are daisy-chained with a 25 μm Al wire through ultrasonic bondings

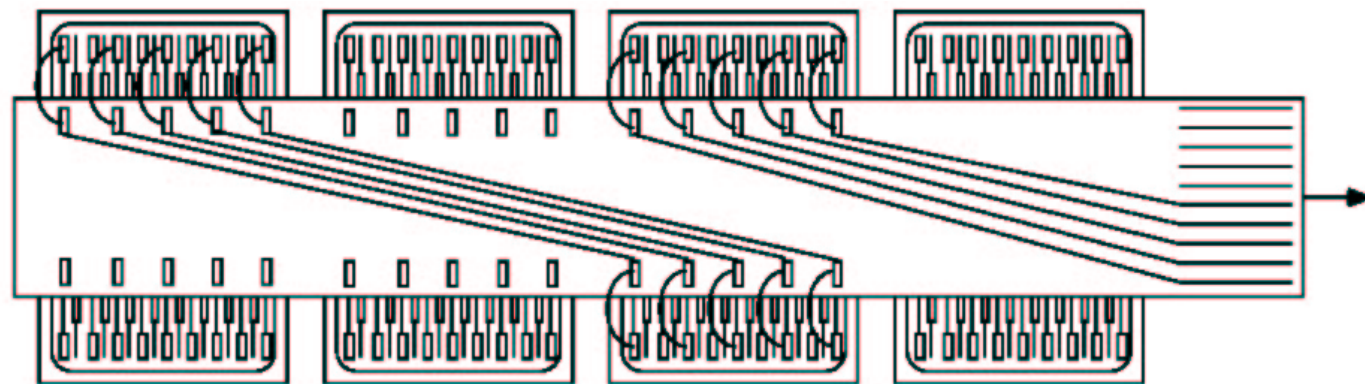


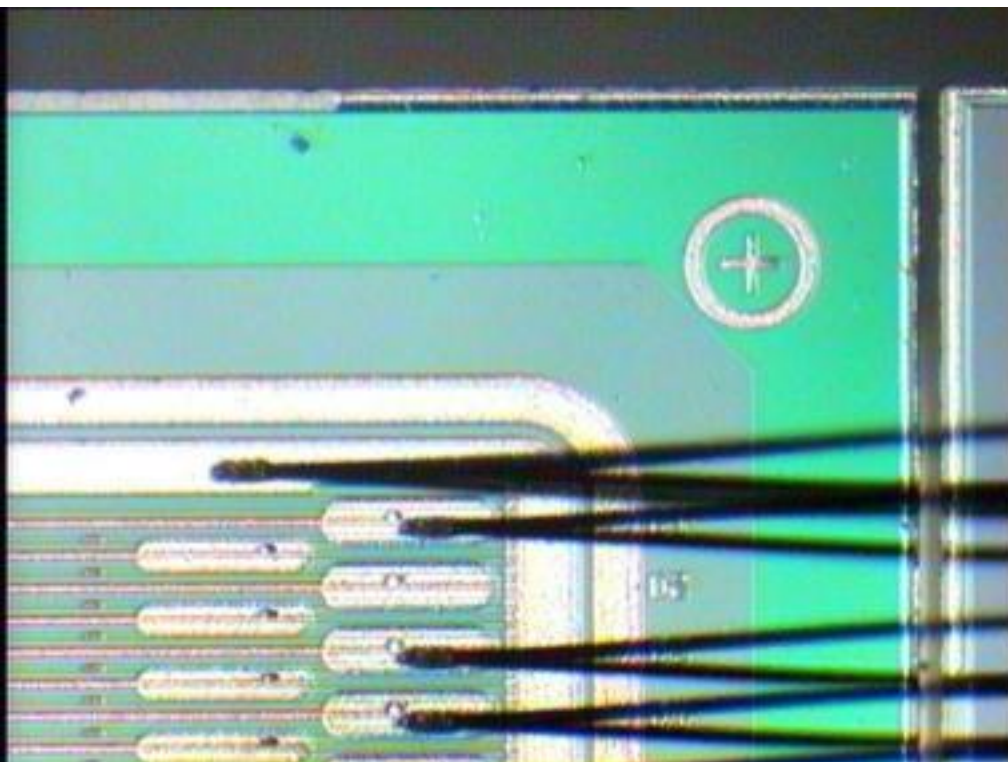


On the N side, the front-end electronics is at one end, so that a special upilex (kapton) fanout to connect the strips to the FEE has been developed

To reduce the number of readout channels, the odd and even strips are connected to same RO channel.

The ambiguity is solved with additional information from TOF

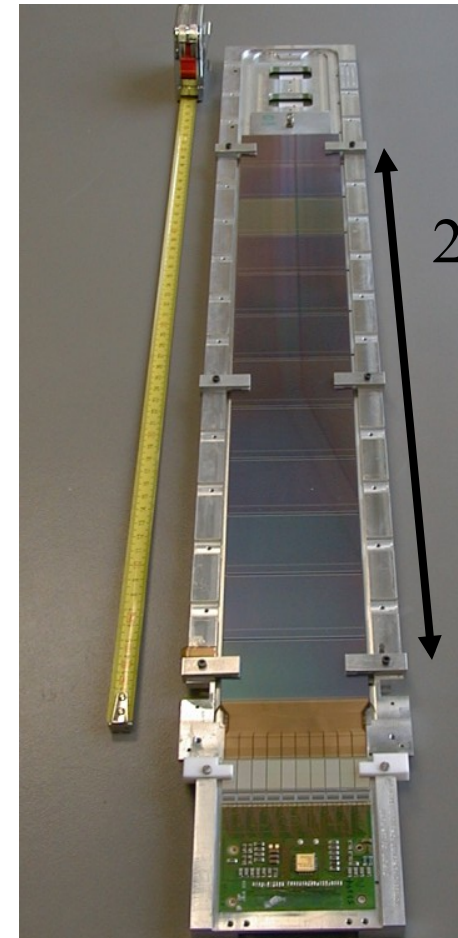
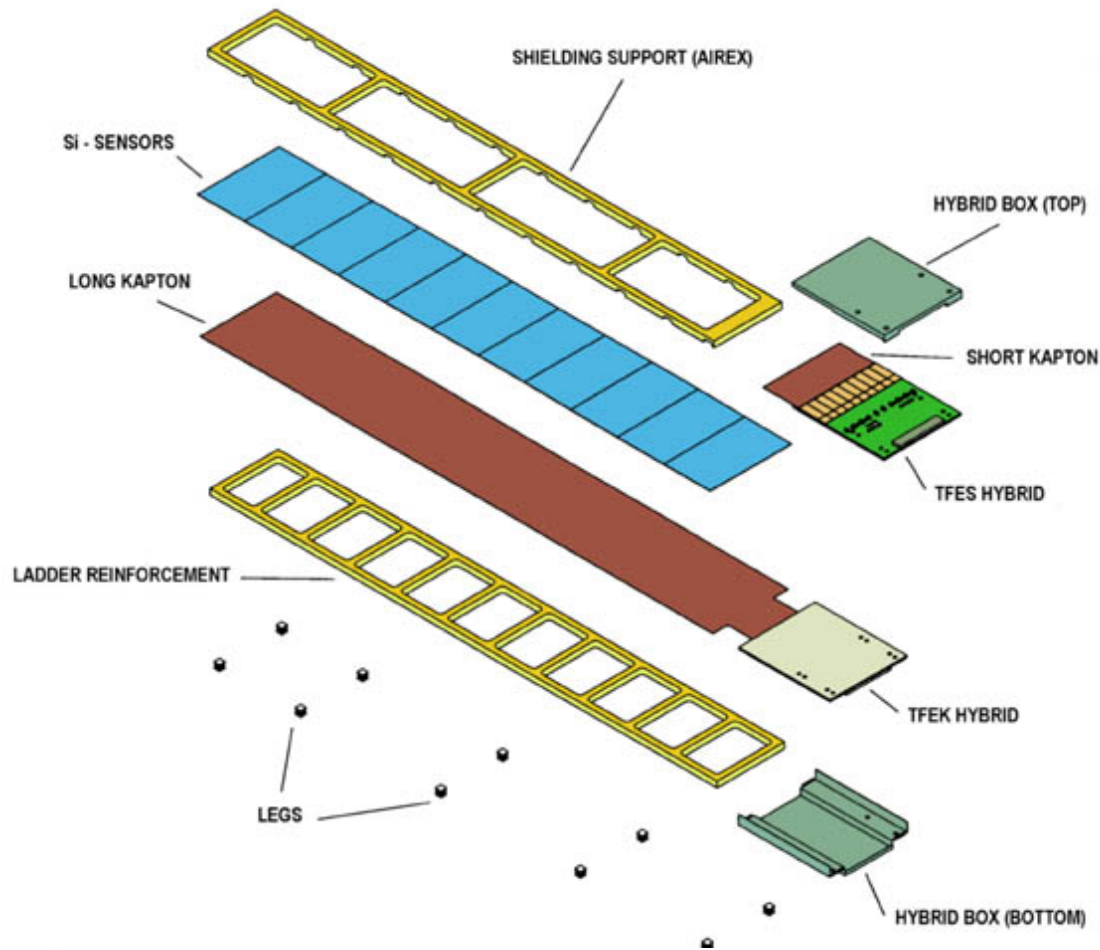




The charge collection is made via the interstrip capacitive charge sharing

To read out all the strips would result in a too much high number of FE electronics channels → the read out pitch is arranged so that a floating strips is left between two readout strips on both sides → On p side the RO pitch is **110 μm → 642 RO chann./ladder**
On N side the RO is **208 μm → 384 RO chann./ladder**
for 196608 RO channels

Silicon Tracker Ladder



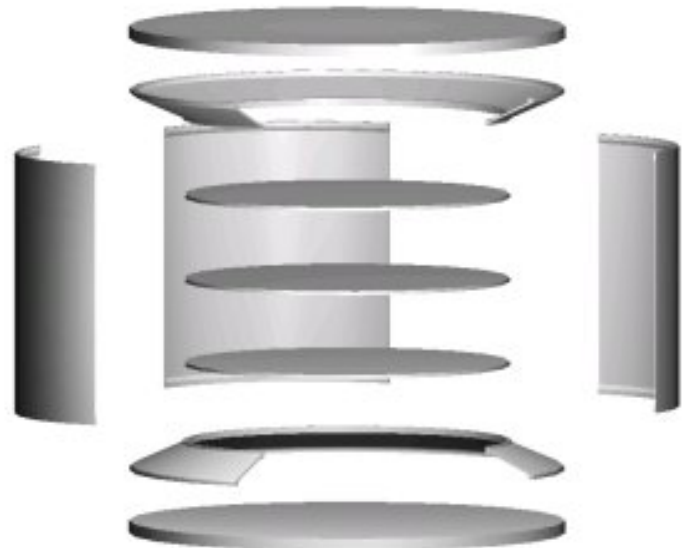
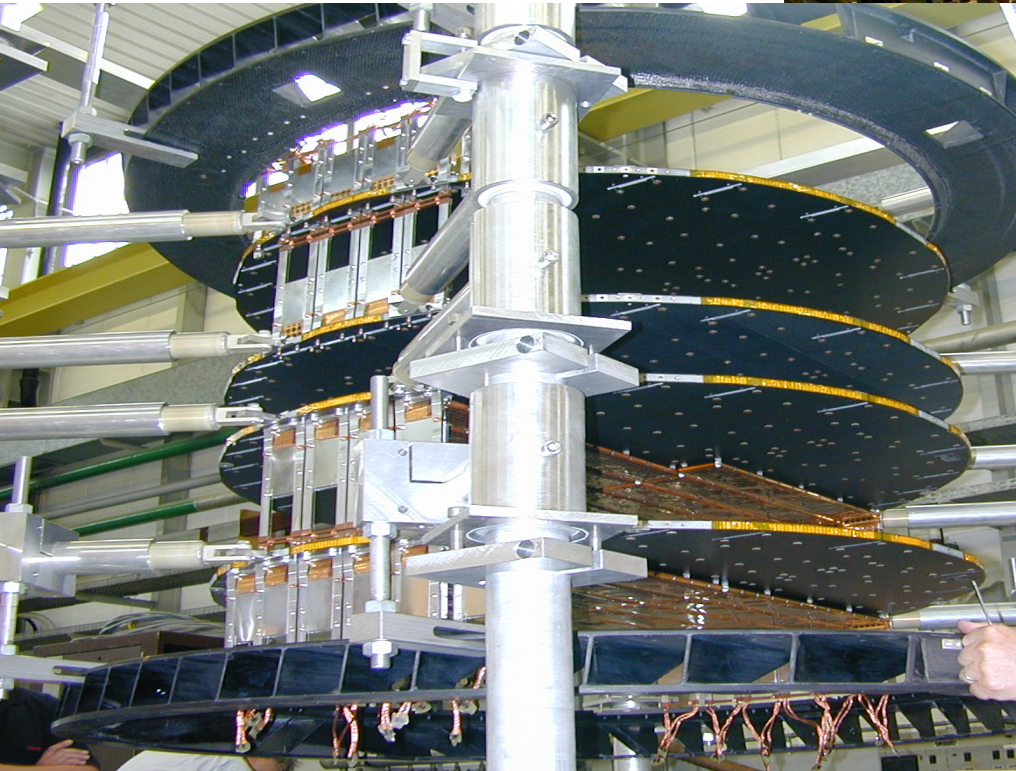
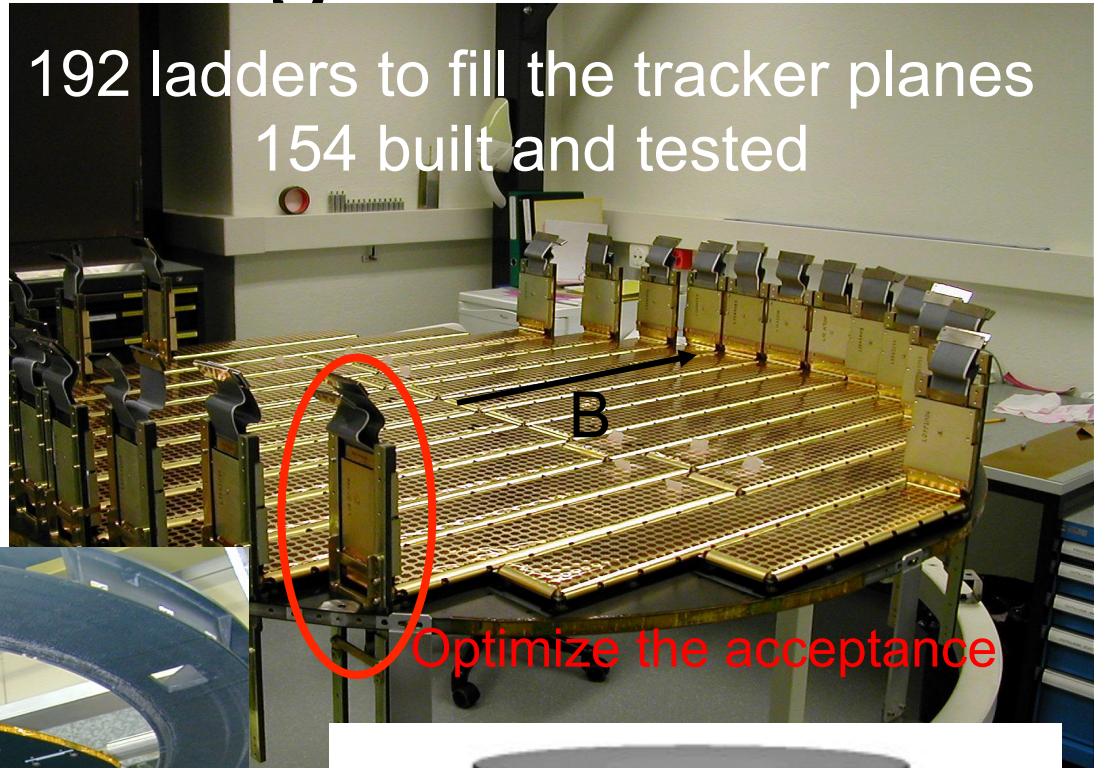
Ladder structural stability is ensured by a carbon fiber foam support structure

To fit the circular magnet bore, the ladders have length from 7 to 15 sensors with 8200- 16500 bonds/ladder

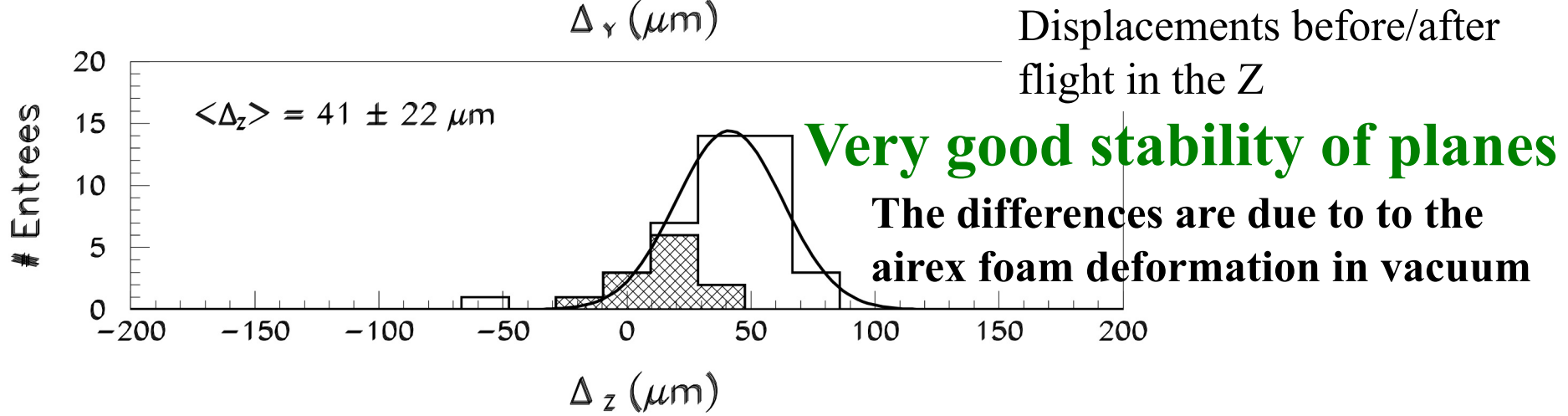
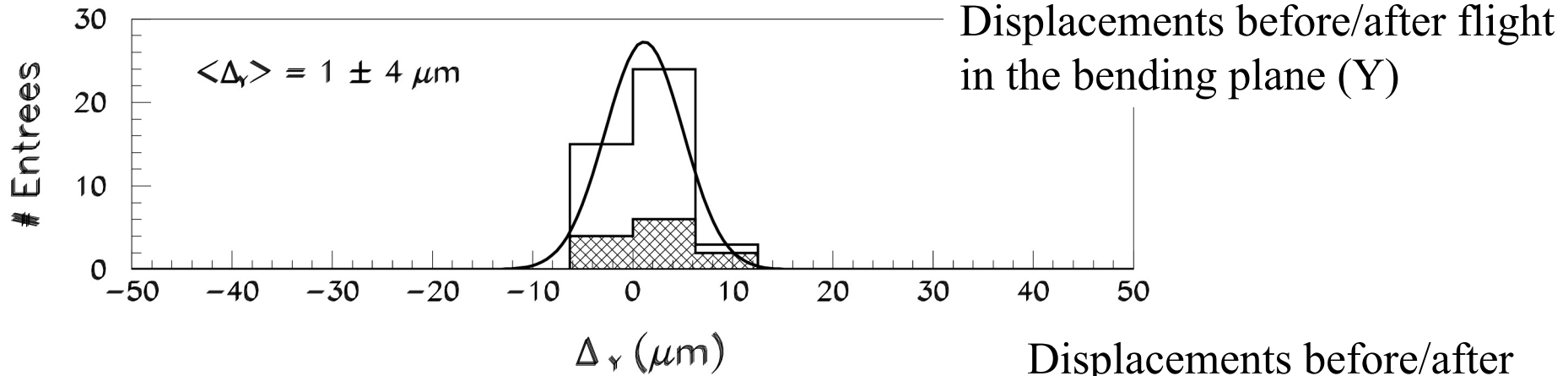
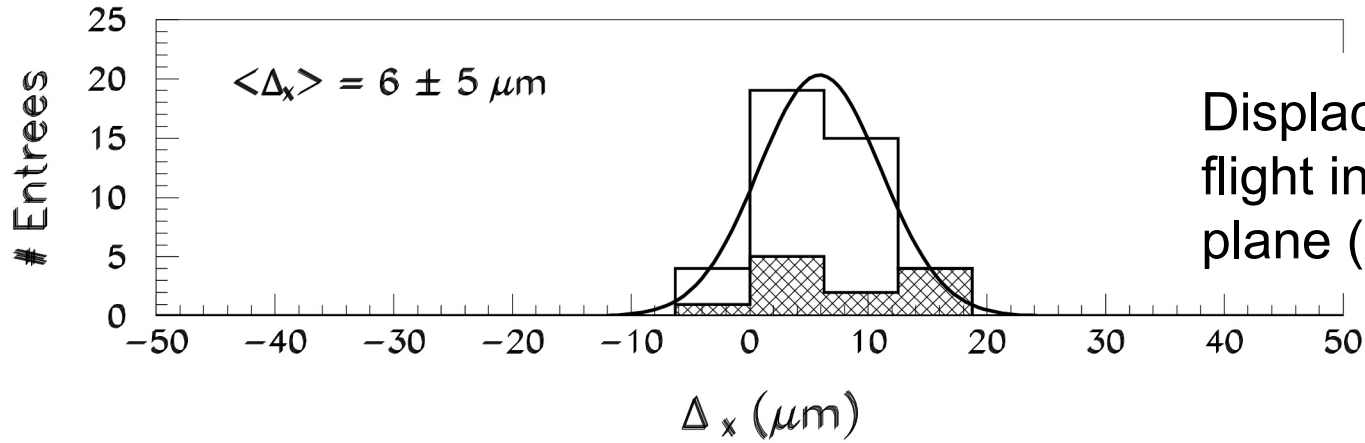
Plane integration

The planes are made a aluminium honeycomb structure enveloped in a carbon fiber foil. This ensures great stability against vibrations and G-forces during the launch

192 ladders to fill the tracker planes
154 built and tested



Plan 2



Rivelatori a stato solido

- ★ **The signal** generated in a silicon detector depends essentially only on the thickness of the depletion zone and on the dE/dx of the particle.
- ★ **The noise** in a silicon detector system depends on various parameters: geometry of the detector, the biasing scheme, the readout electronics, etc.
- ★ Noise is typically given as “equivalent noise charge” ENC. This is the noise at the input of the amplifier in elementary charges.