

Rivelatori a semiconduttore

Giuliana Rizzo - Università di Pisa

Applicazioni in fisica delle alte energie

Outline

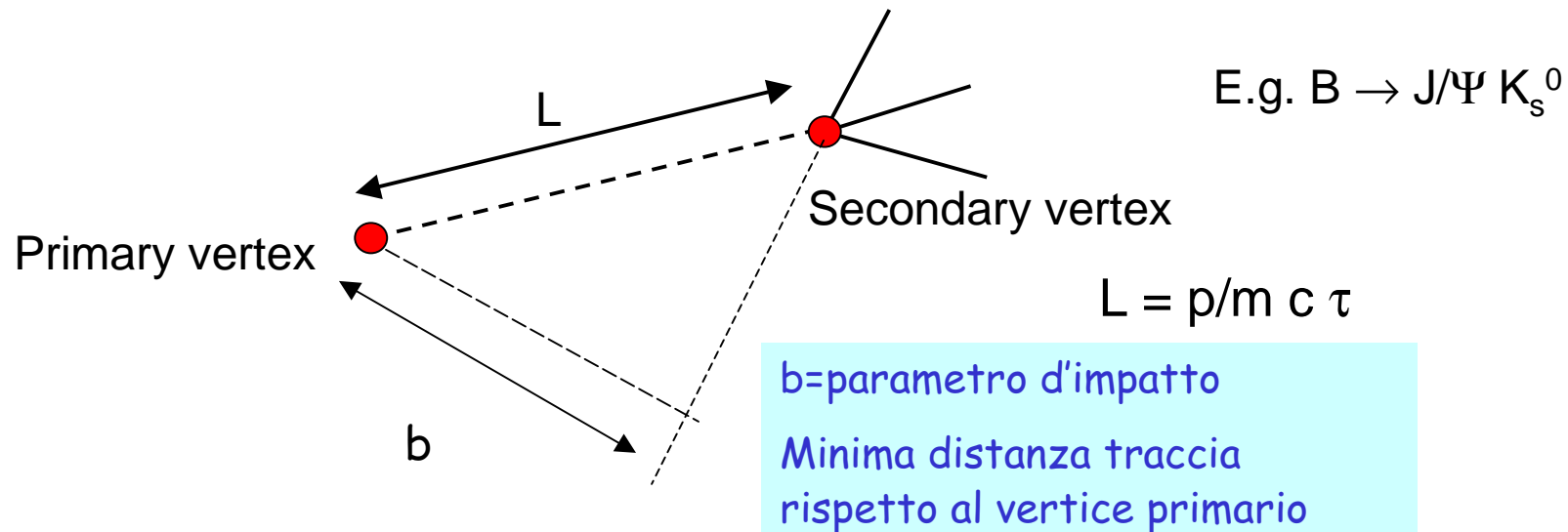
- Motivazioni
- Un po' di storia
- Principio di funzionamento e caratteristiche rivelatori a strip
 - semiconduttori e giunzione p-n
 - funzionamento e scelte tecniche
 - Processo di fabbricazione
 - segnale e rumore
 - risoluzione spaziale
- Esempio di un rivelatore a strip: SVT di BABAR
- Altri rivelatori a semiconduttore:
 - Pixel, Silicon drift chamber, CCD, 3D, pixel monolitici

Rivelatori a semiconduttore

- Utilizzati da tempo in fisica nucleare per misure di energia
- In fisica delle alte energie sono stati utilizzati a partire dagli anni '80 come rivelatori di posizione (tracciatura di particelle).
- Grazie alle peculiarità di questi rivelatori (ottima risoluzione spaziale, compattezza, velocità):
 - è stato possibile lo studio della fisica dei flavour pesanti
 - sono fondamentali nei sistemi di tracciatura di tutti gli attuali e futuri esperimenti HEP

Particelle con flavour pesate (B, D, tau):

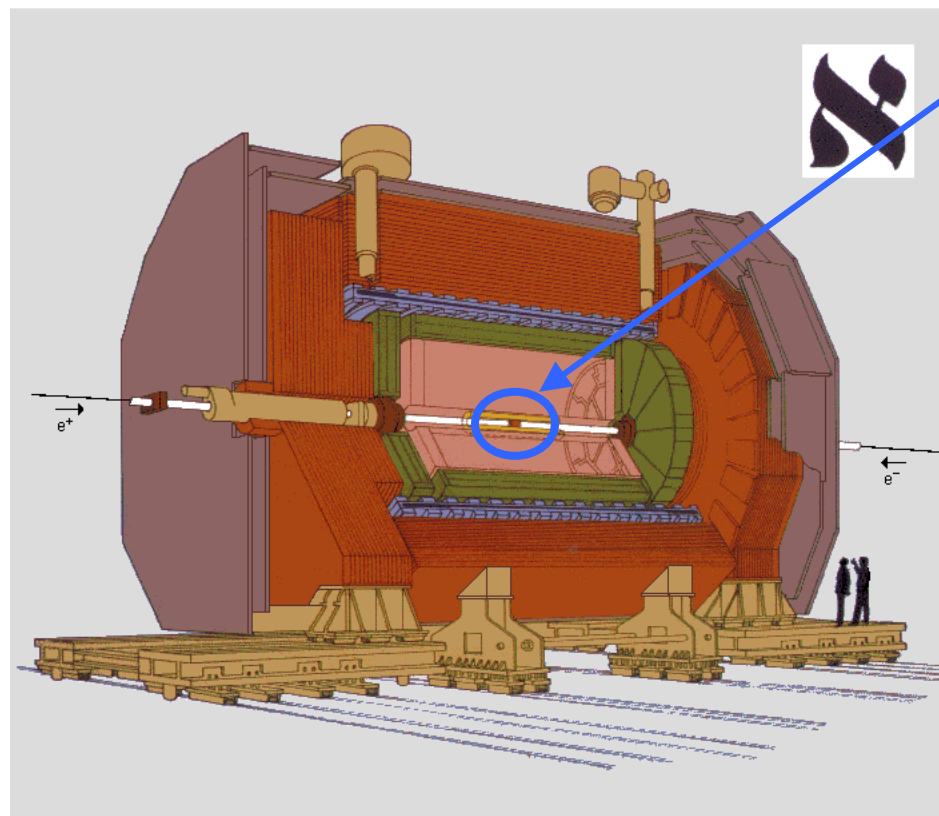
- Vita media dell'ordine di 1 ps
- Decadono a circa 1 mm dal vertice primario dell'interazione producendo vertici secondari
- Le tracce che provengono da vertici secondari hanno elevato parametro d'impatto



Rivelatori al silicio nel cuore del sistema di tracciatura

- Forniscono punti ad elevata risoluzione vicino alla zona d'interazione per estrapolare le tracce al punto d'interazione o nelle vicinanze
- Migliorano la risoluzione sul parametro d'impatto e permettono la ricostruzione dei vertici secondari
- Fondamentali per la fisica dei flavour pesanti:
 - Identificazione di eventi di b in presenza di tracce ad alto parametro d'impatto
 - Misure di vita media dalla ricostruzione della lunghezza di decadimento o del parametro d'impatto

ALEPH

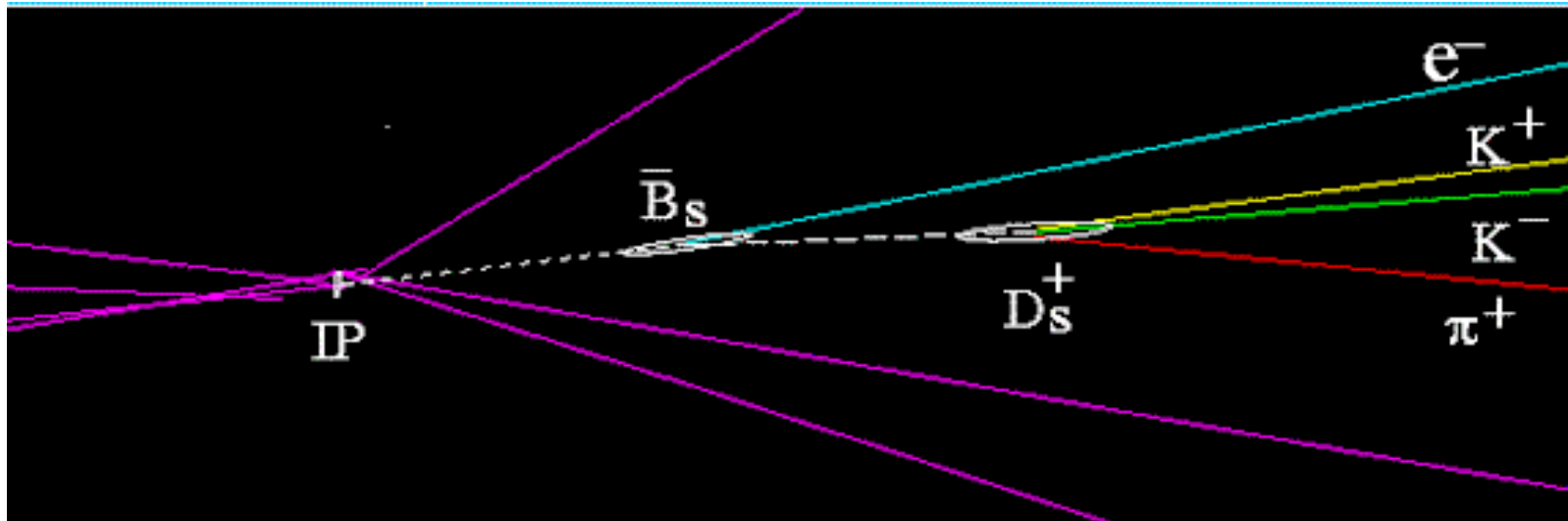


- Vertex Detector
- Inner Tracking Chamber
- Time Projection Chamber
- Electromagnetic Calorimeter
- Superconducting Magnet Coil
- Hadron Calorimeter
- Muon Chambers
- Luminosity Monitors

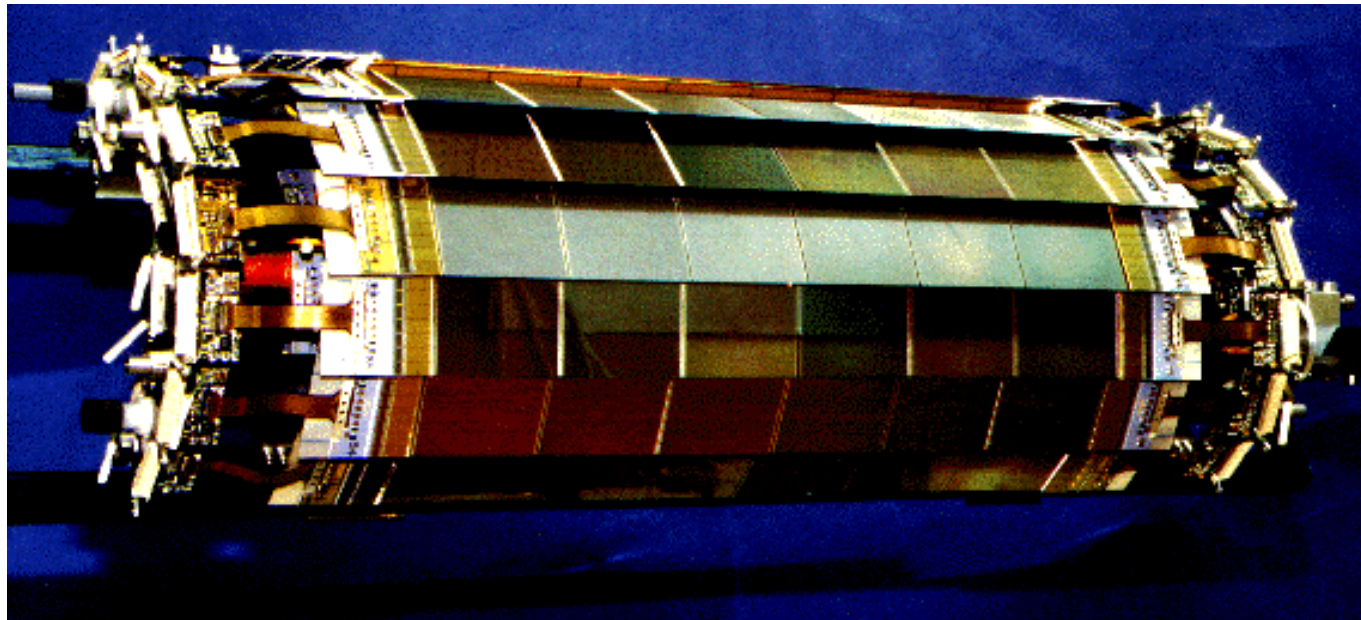
The ALEPH Detector

B-physics

- Detecting vertices ...



ALPEH - VDET (the upgrade)



- 2 silicon layers, 40cm long, inner radius 6.3cm, outer radius 11cm
- 300 μm Silicon wafers giving thickness of only $0.015X_0$
- S/N $r\Phi = 28:1$; $z = 17:1$
 $\sigma_{r\phi} = 12\mu\text{m}$; $\sigma_z = 14\mu\text{m}$

Risoluzione sul parametro d'impatto per tracce ricostruite con 2 hits nel rivelatore di vertice (ALEPH)

$$\sigma_b = 25\mu m + \frac{95\mu m}{p(\text{GeV}/c)^{-1}}$$

Senza hit in VDET tracce a 45 GeV/c

$$\sigma_b = 110\mu m$$

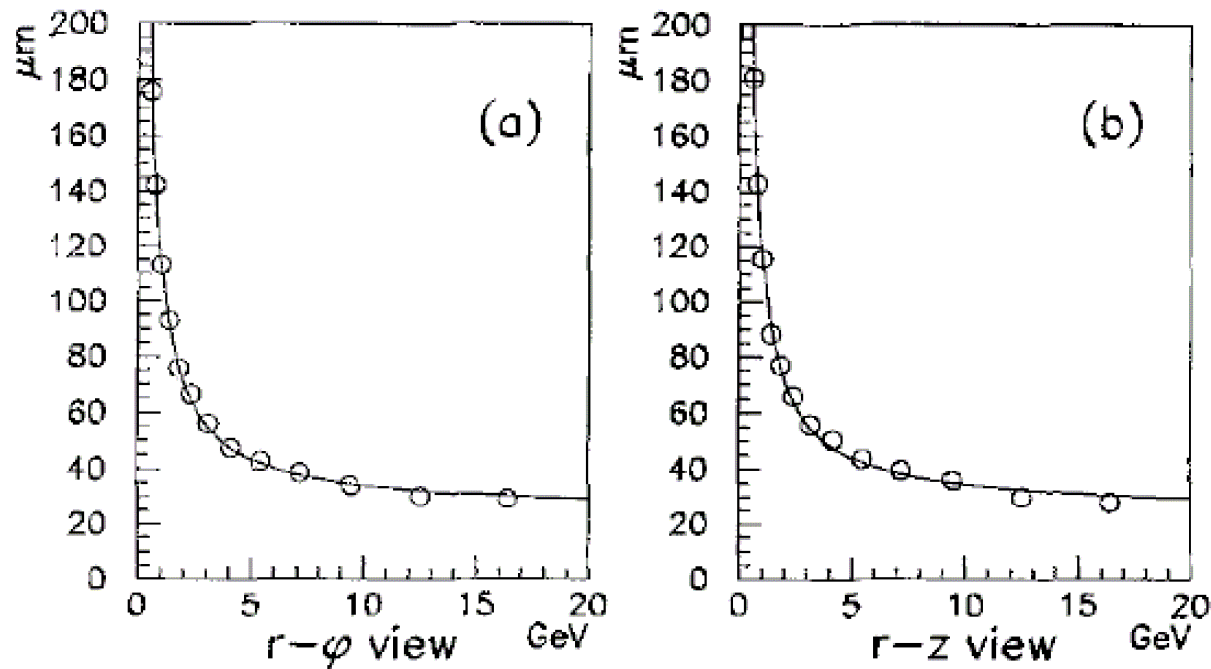
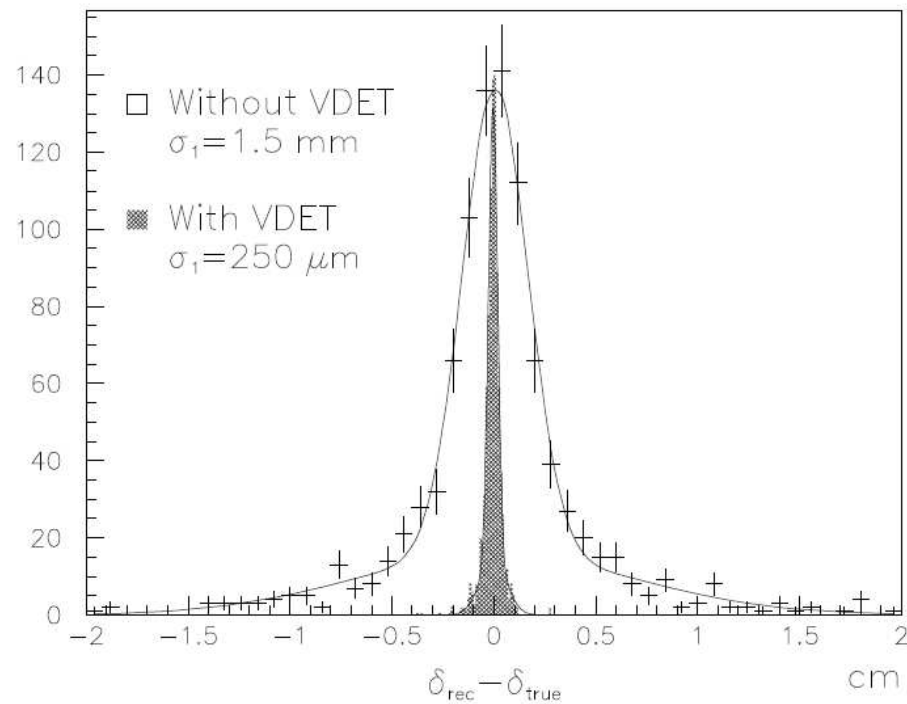


Fig. 15. The impact parameter resolution for tracks with VDET hits in two layers as a function of their momentum.

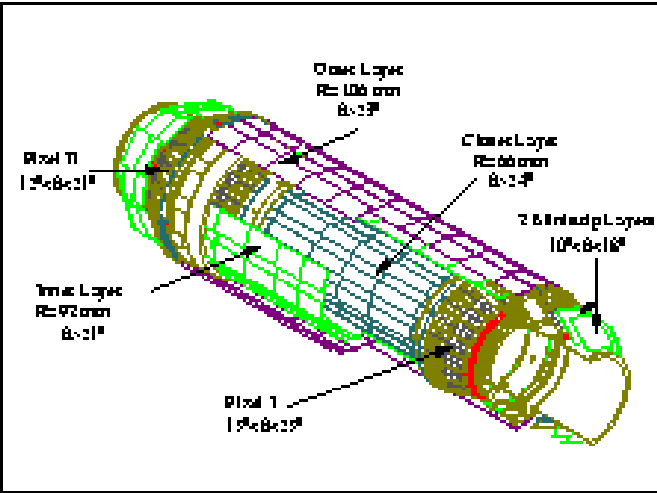
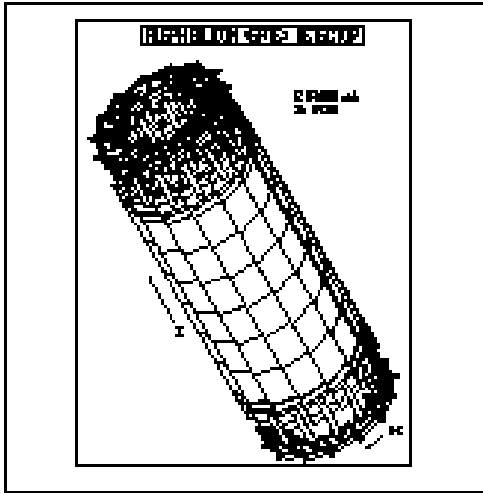
Risoluzione sulla lunghezza di decadimento con e senza VDET (ALEPH)



LEP: Aleph started the game first, immediately followed by the others

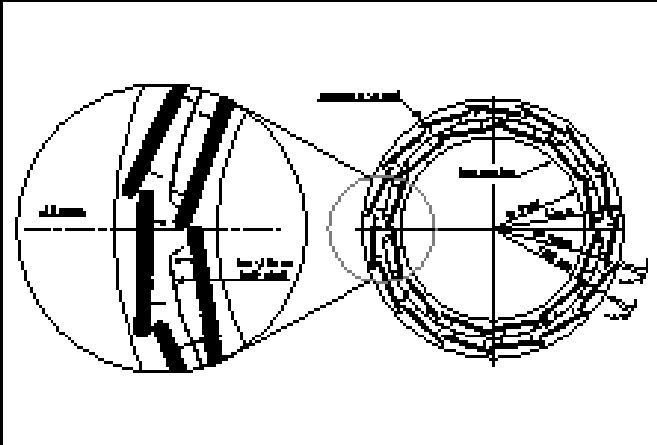
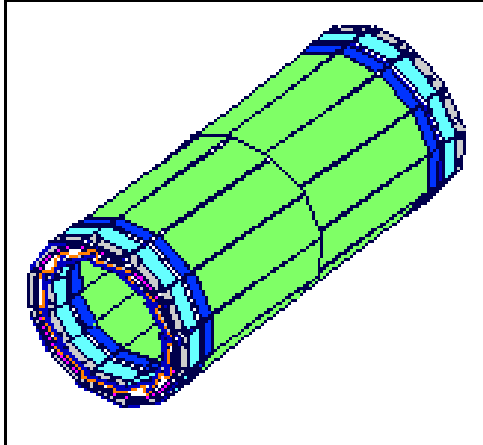
1986-2000

ALEPH
VDETII



DELPHI
Si Tracker

OPAL
 μ VTX3



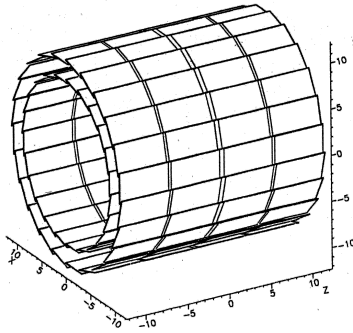
L3
SMD

The trackers were also upgraded during the lifetime of the experiments

1986-2000

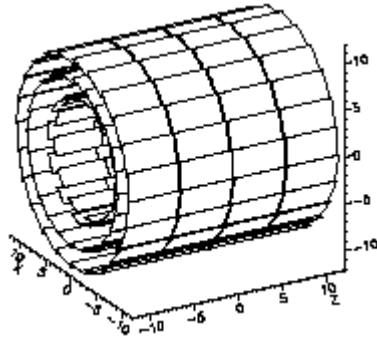
1989-1990

192 detectors (all s-s)
55296 readout channels



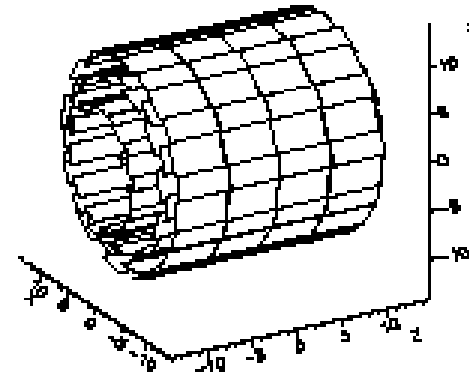
1991-1993

288 detectors (all s-s)
73728 readout channels

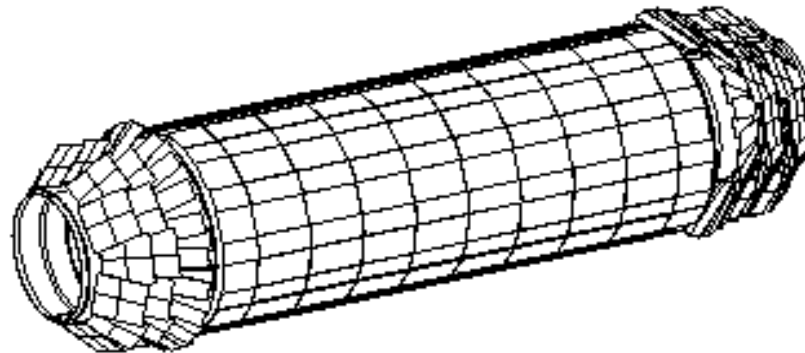


1994-1995

288 detectors (96 s-s, 192 d-s)
125952 readout channels



1996-2000



888 detectors,
1399808 readout channels:

736 strip detectors with
174080 readout channels

1225728 pixels

From A. Zalewska

The timescale of evolution...

H. Sadrozinski, Application of Silicon Detectors, IEEE Trans NS-48, nr. 4 (2001), 933

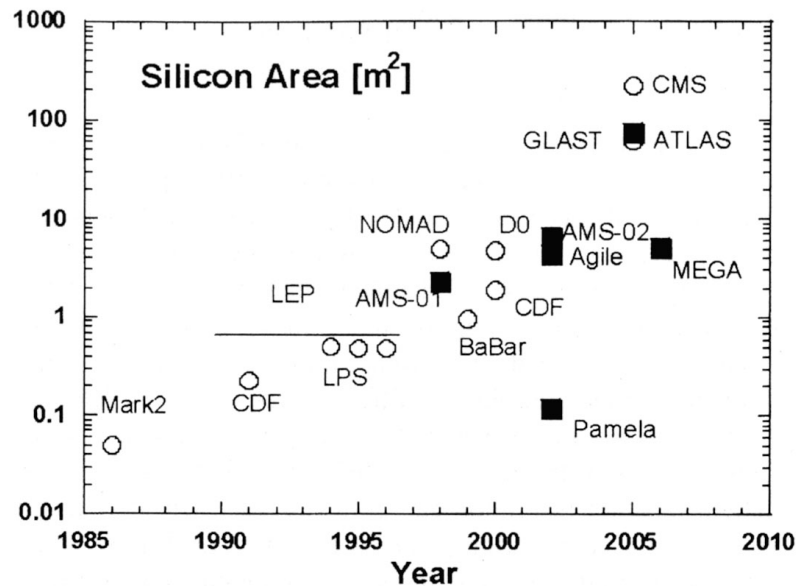


Fig. 4. The rise of the silicon detector: area of silicon detectors in experiments as a function of time. The full squares denote space-based instruments. The exponential growth of the area with time is an expression of Moore's law.

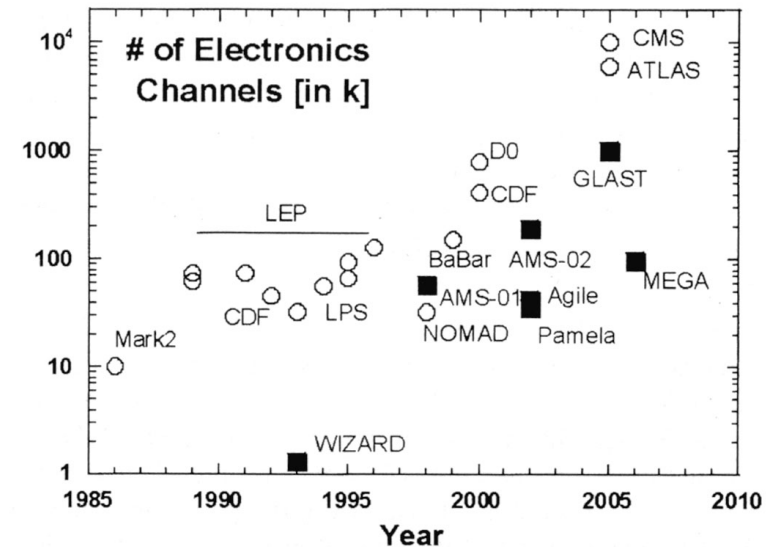
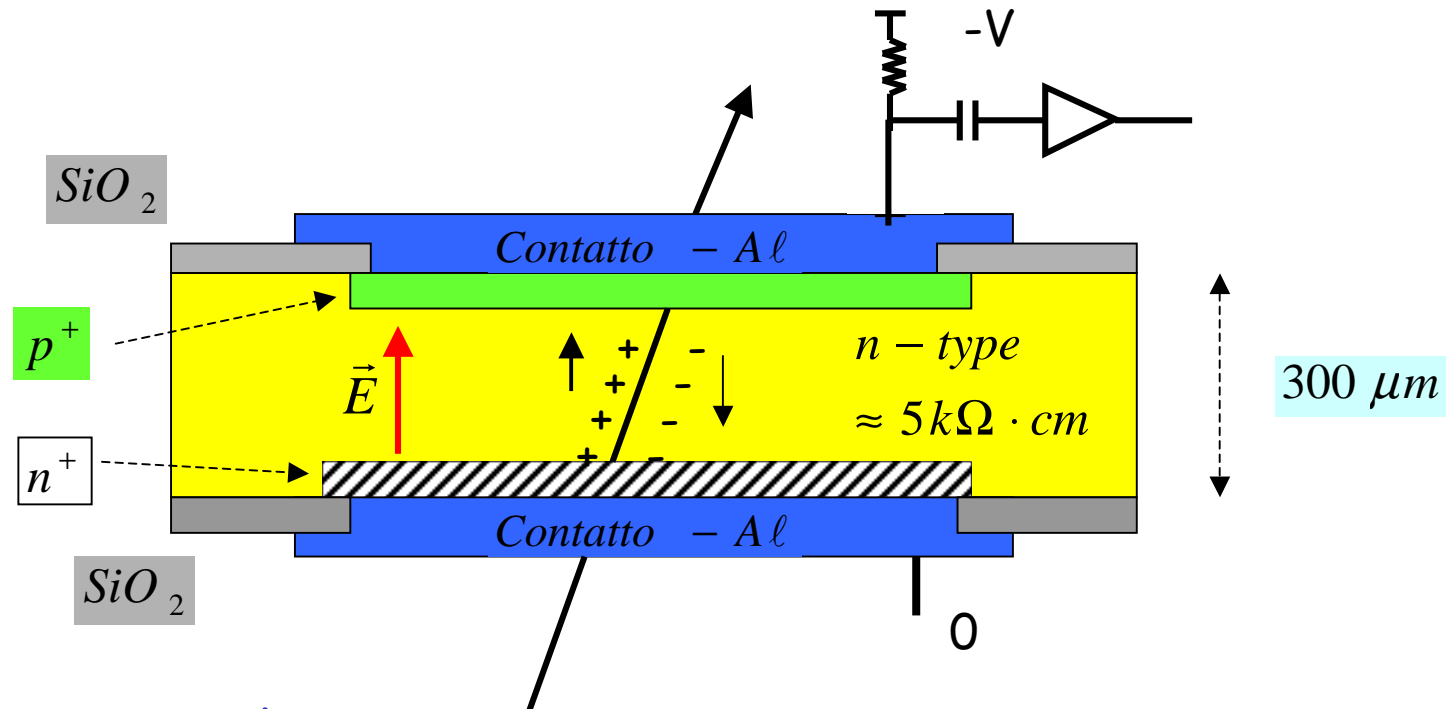


Fig. 5. The rise of the silicon detector: number of electronics channel of silicon detectors in experiments as a function of time. The full squares denote space-based instruments. The exponential growth of the number of channels with time is an example of a "Moore's plot."

Perche' il silicio per la tracciatura?

- Permette elevata segmentazione e precisione di pochi um sul punto
- Alta velocita' (raccolta' di carica in ~10 ns)
- Bassa energia (3.6 eV) per creare coppia elettrone- lacuna (~30 eV gas)
- Alta densita' e numero atomico:
 $\rho = 2.33 \text{ g / cm}^3$ $dE / dx_{MIN} = 1.66 \text{ MeV / g} \cdot \text{cm}^{-2}$
 - rilascio di energia in 300 um di Si ~ 24000 e-h
- Solido e compatto

Camere a ionizzazione a stato solido



- Rispetto al gas:
 - Più denso -> più sottile (300 μm di Si)
 - Carica sufficiente senza moltiplicazione
 - Utilizza i portatori di entrambi i segni
 - Bassa energia di ionizzazione

Domande

- Quanta energia perde la particella
- Quanta carica produce
- Quanta carica riesco a raccogliere
- Riesco a distinguerla da rumore

Parametro fisico

ρ , Z , spessore

$$dE/dl = \rho \times 1.66 \text{ MeV/g}\cdot\text{cm}^{-2}$$

- E_I = Energia di ionizzazione
 $Q = q \cdot \Delta E / E_I$
- Mobilita'
Vita media dei portatori
Intrappolamento
- Corrente di leakage
Rumore elettronico

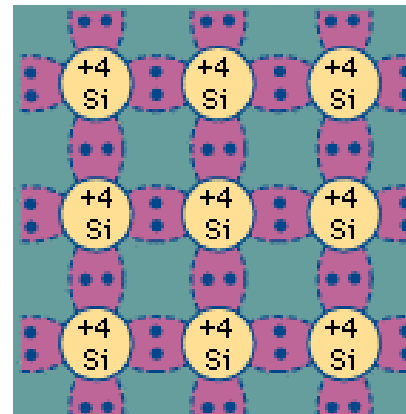
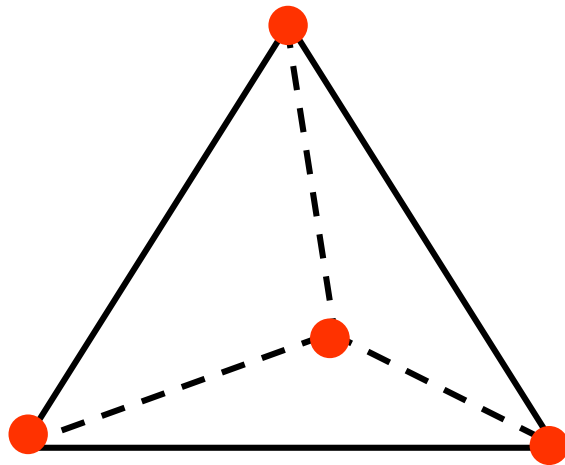
E' necessario:

- Energia di ionizzazione piccola
 - $E_i < 20-30 \text{ eV}$
- Mobilita' elevata
- Vita media dei portatori elevata
 - $\tau > 100 \text{ us}$
- Leakage basso
 - Pochi portatori liberi a temperatura ambiente
- Queste caratteristiche si trovano in Si, Ge, GaAs (**semiconduttori**)

Cristallo di Silicio

Gli elettroni di **valenza** sono usati per costruire il legame fra due ioni adiacenti. Silicio e germanio (i semiconduttori più comuni) hanno legami covalenti.

Sia il silicio che il germanio hanno una struttura cristallina come indicato, cioè hanno un legame **tetravalente**.

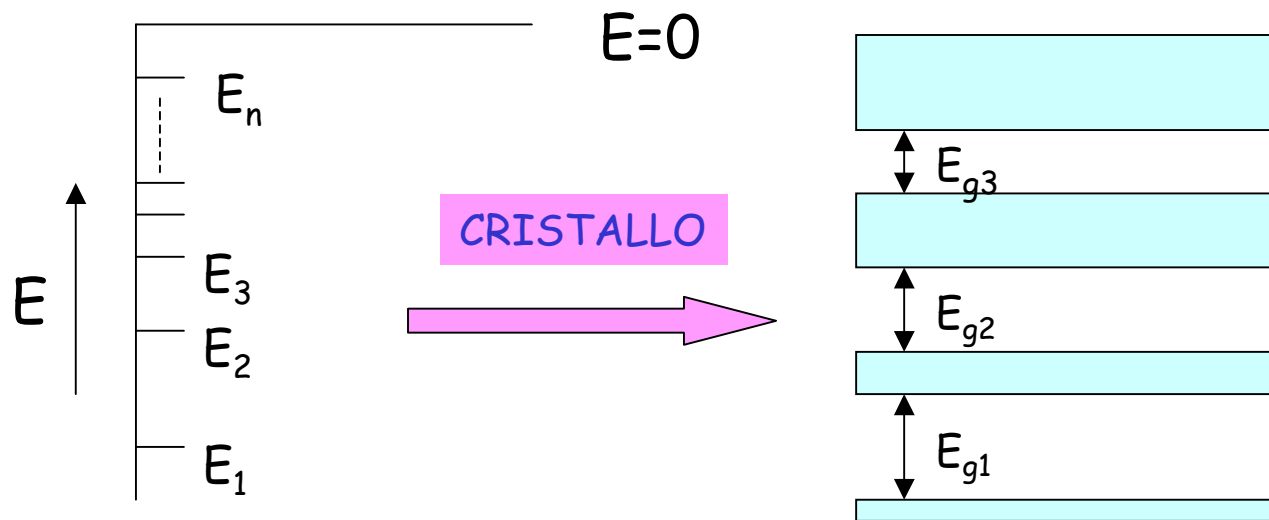


Il silicio ha in totale **14** elettroni di cui **4** di valenza → il nucleo ionico ha carica **+4**.

Siccome gli elettroni di valenza servono ad unire gli atomi adiacenti, sono strettamente legati al nucleo a 0 K → bassa conducibilità.

Struttura a bande nei cristalli

- La struttura cristallina trasforma I livelli atomici discreti in bande di energia continue



- La struttura delle bande (gap, larghezze) dipende dal tipo di cristallo
- L'occupazione delle bande dipende dal numero di elettroni disponibili (posizione nella tavola periodica)
- L'ultima banda completamente occupata e' detta di valenza, quella successiva di conduzione

Conduttori, Semiconduttori, Isolanti

• In un metallo banda di conduzione e di valenza sono sovrapposte. →

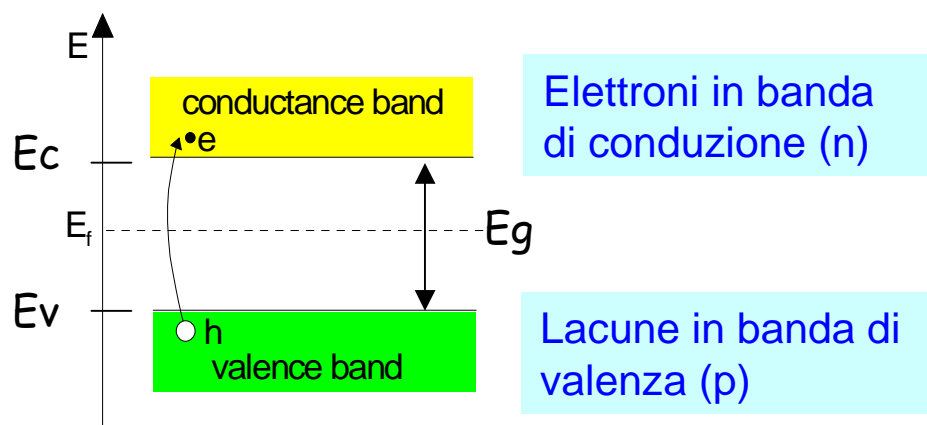
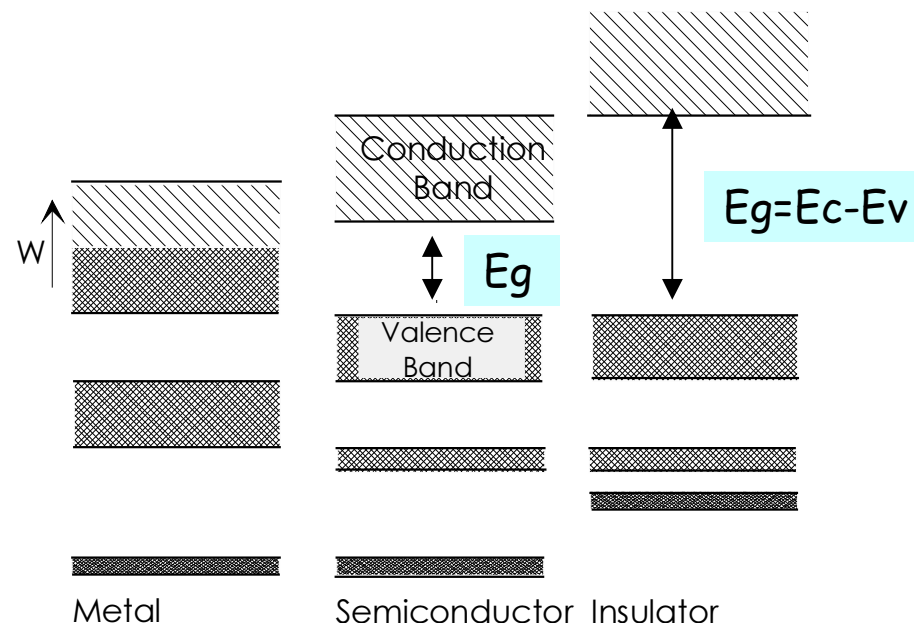
• molti elettroni liberi e alta conducibilità. ($n \sim 10^{22}$ elettroni/cm³)

• In semiconduttori ed isolanti banda di valenza e di conduzione sono separate:

Isolanti $E_g \geq 5$ eV

Semiconduttori $E_g \leq 1$ eV

(Si $E_g = 1.12$ eV, Ge $E_g = 0.67$ eV)



• 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.

Mobilita' e Resistivita'

- Mobilita': $\mu_{e,h} = v_{e,h} / E$
 - μ dipende dal campo E (saturazione per alti campi) e dalla densita' di drogante

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

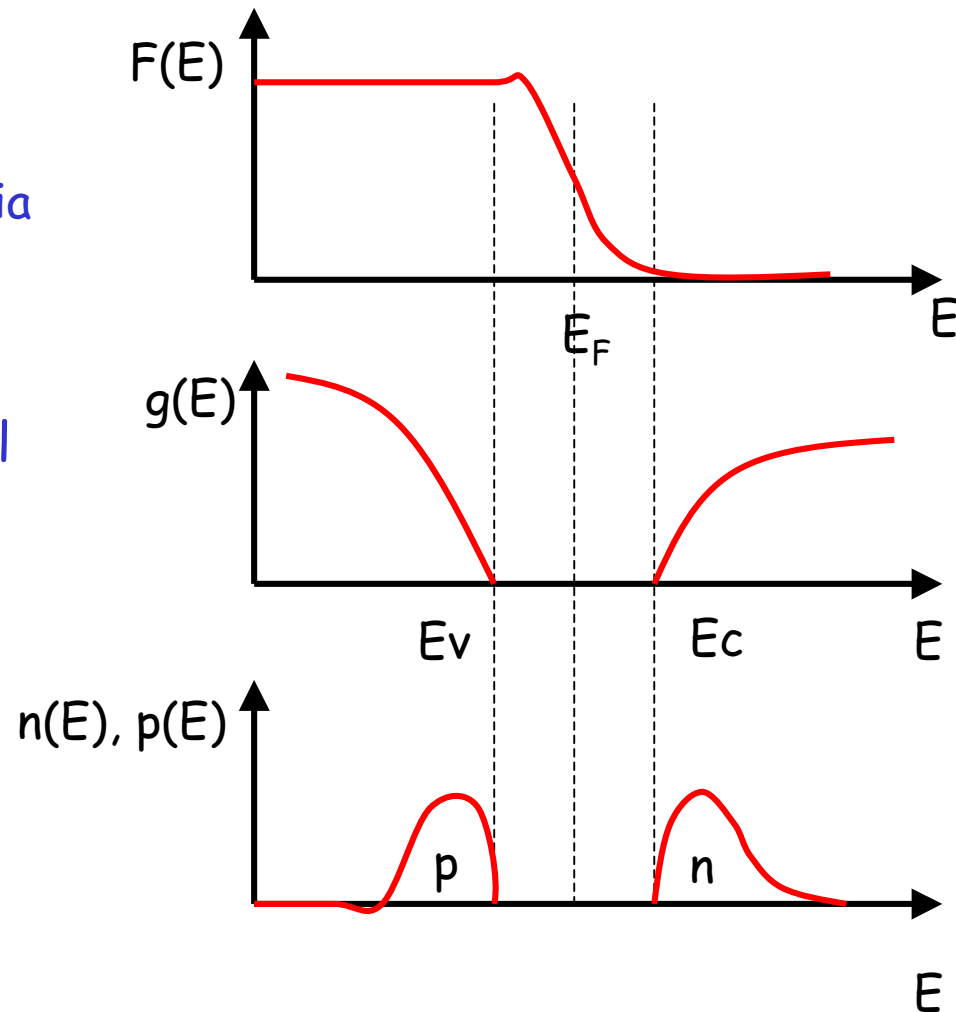
- Resistivita'

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

- Semiconduttori estrinseci (puri)
 - Si $\rho = 230 \text{ K}\Omega\text{cm}$, Ge $\rho = 45 \text{ }\Omega\text{cm}$

Portatori all'equilibrio termico

- Probabilità di occupazione: Fermi-Dirac $f(E)$
 - Livello di Fermi E_F = energia per cui si ha probabilità di occupazione 1/2
- Densità degli stati $g(E)$: dal calcolo delle bande ("stato solido")
- Densità di portatori:
 $n(E) = f(E) \cdot g(E)$
 $p(E) = [1 - f(E)] \cdot g(E)$
- Nei semic. Intrinseci $n=p$



Densita' di portatori in semiconduttori intrinseci

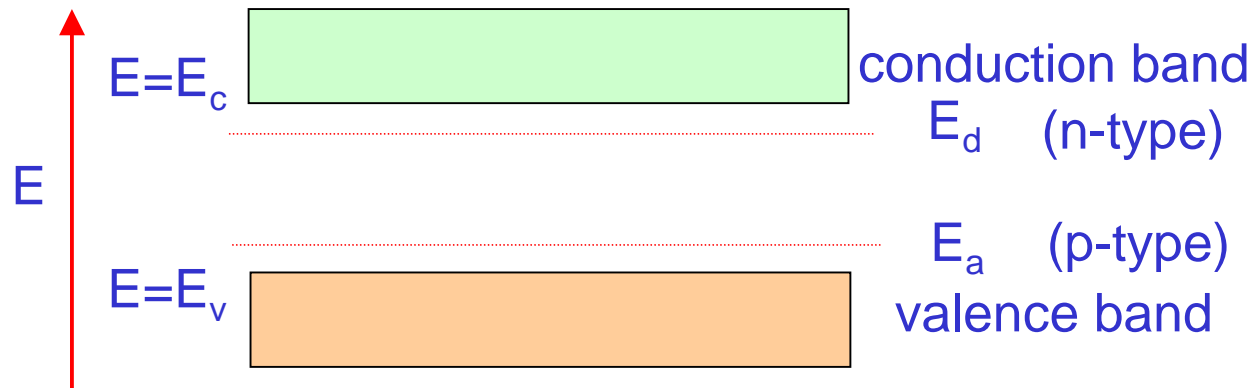
- Nei semiconduttori intrinseci (non drogati):

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

- Densita degli stati ai bordi delle bande
- Fattore termico: raddoppio ogni 8°C
- Livello di Fermi a meta' della gap
- Per Si (a Temp ambiente) $n_i = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Semiconduttori drogati

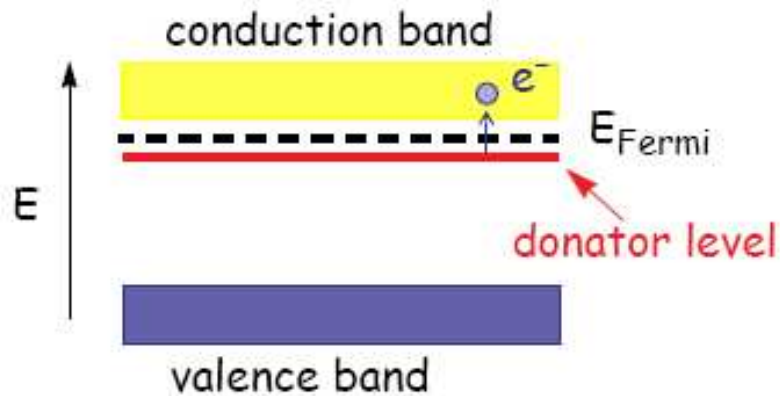
- Drogaggio: sostituzione di un atomo del cristallo con un elemento diverso (semiconduttori estrinseci)
- Droganti introducono livelli energetici:
 - Pieni vicini a E_c = tipo n = donori (V gruppo: 5 e- valenza: P, As)
 - Vuoti vicini a E_v = tipo p = accettori (III gruppo: 3 e- valenza: B, Ga)



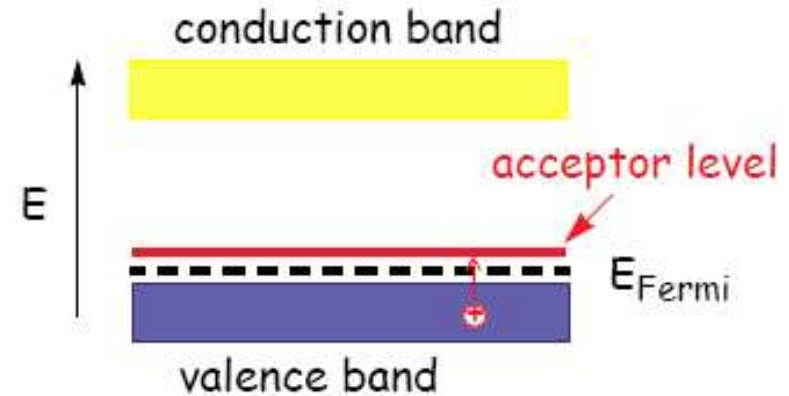
Doping of Semiconductors

By adding small amounts of impurities to semiconductors their conductivity can be changed drastically:

By adding elements from group V
(donator, like As)
one obtains **n - type**



By adding elements from group III
(acceptor, like B)
one obtains **p - type**



Densita' di portatori in semiconduttori drogati

- Legge di azione di massa sempre valida $n \cdot p = n_i^2$
- Livello di Fermi nei semiconduttori drogati si sposta verso E_c (tipo n) o verso E_v (tipo p):
 - $n = n_i \cdot \exp[(E_F - E_i)/kT]$
 - $p = n_i \cdot \exp[(E_i - E_F)/kT]$
- Assunzioni:
 - Semiconduttori tipo n:
 - Livelli donori tutti ionizzati $n = N_D =$ portatori maggioritari
 - $n =$ elettroni in b. conduzione, $N_D =$ densita' di drogante donore
 - Densita' di lacune (portatori di minoranza) $p = n_i^2 / N_D$
 - Semiconduttori tipo p:
 - Livelli accettori tutti occupati $p = N_A =$ portatori maggioritari
 - $p =$ lacune in b. valenza, $N_A =$ densita' di drogante accettore
 - Densita' di elettroni (portatori di minoranza) $n = n_i^2 / N_A$

Riassunto proprieta' del Si

- Nel silicio puro $E_g = E_c - E_v = 1.12 \text{ eV}$ ed $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ a temperatura ambiente. Nei silici drogati (n o p) anche compensati ($n = ND - NA$) non si riesce a ridurre la densita' di portatori al di sotto di 10^{11} cm^{-3}
- In un silicio di superficie 1 cm^2 e spessore $300 \mu\text{m}$ abbiamo 4.5×10^8 portatori di carica, ma una particella al minimo (MIP) crea circa 2.4×10^4 coppie e-h $\rightarrow S/N \sim 10^{-4} \rightarrow$ impossibile vedere un segnale.
- Il controllo del leakage non e' possibile con il drogaggio uniforme
- Si può migliorare la situazione raffreddando il silicio (**non molto pratico**) o svuotandolo (**depleting**) \rightarrow nella regione di svuotamento o di carica spaziale la densita' di portatori liberi e' molto ridotta

La giunzione p-n

Consideriamo 2 pezzi di silicio uno di tipo **p** e l'altro di tipo **n** e attacchiamoli l'uno all'altro.

Normalmente il **p⁺** è più drogato dell' **n**.

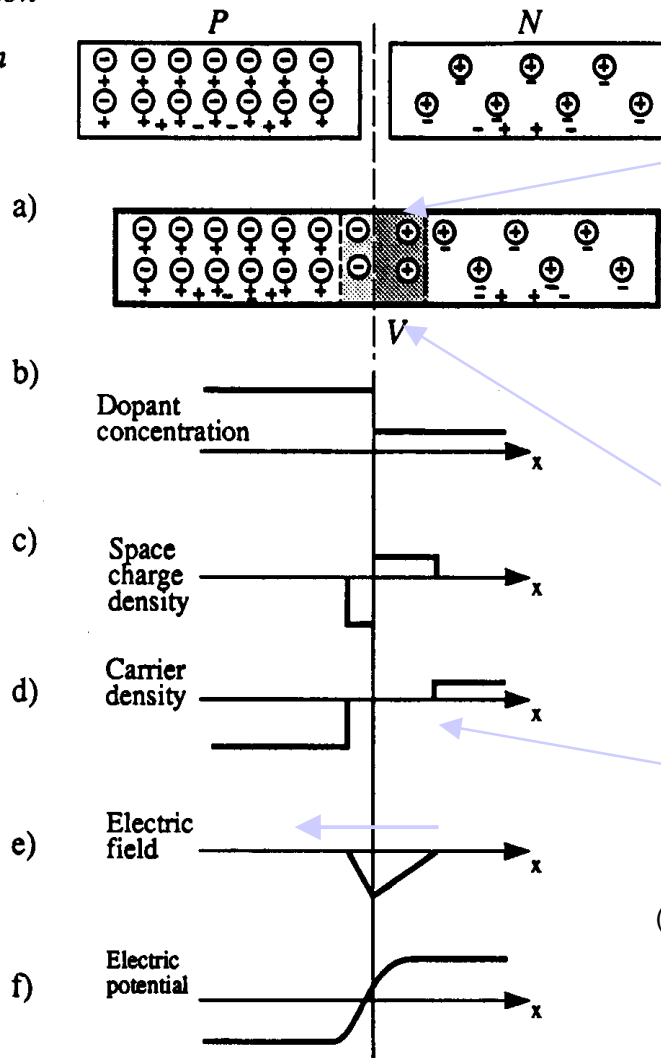
Valori tipici di drogaggio sono: $10^{12}/\text{cm}^3$ (**n**) e $10^{15}/\text{cm}^3$ (**p**) (molto minori che nei circuiti integrati e diodi o transistor, nei quali la concentrazione è $\sim 10^{17(18)}/\text{cm}^3$)

Nella fabbricazione del silicio utilizzato per rivelatori e' fondamentale il controllo del livello di impurezze.

10^{22} atomi/ cm^3 , drogaggio $10^{12}/\text{cm}^3 \Rightarrow$ impurezze al di sotto di 1 parte in 10^{11}

- ⊖ Acceptor ion
- ⊕ Donor ion
- + Hole
- Electron

THE PN JUNCTION



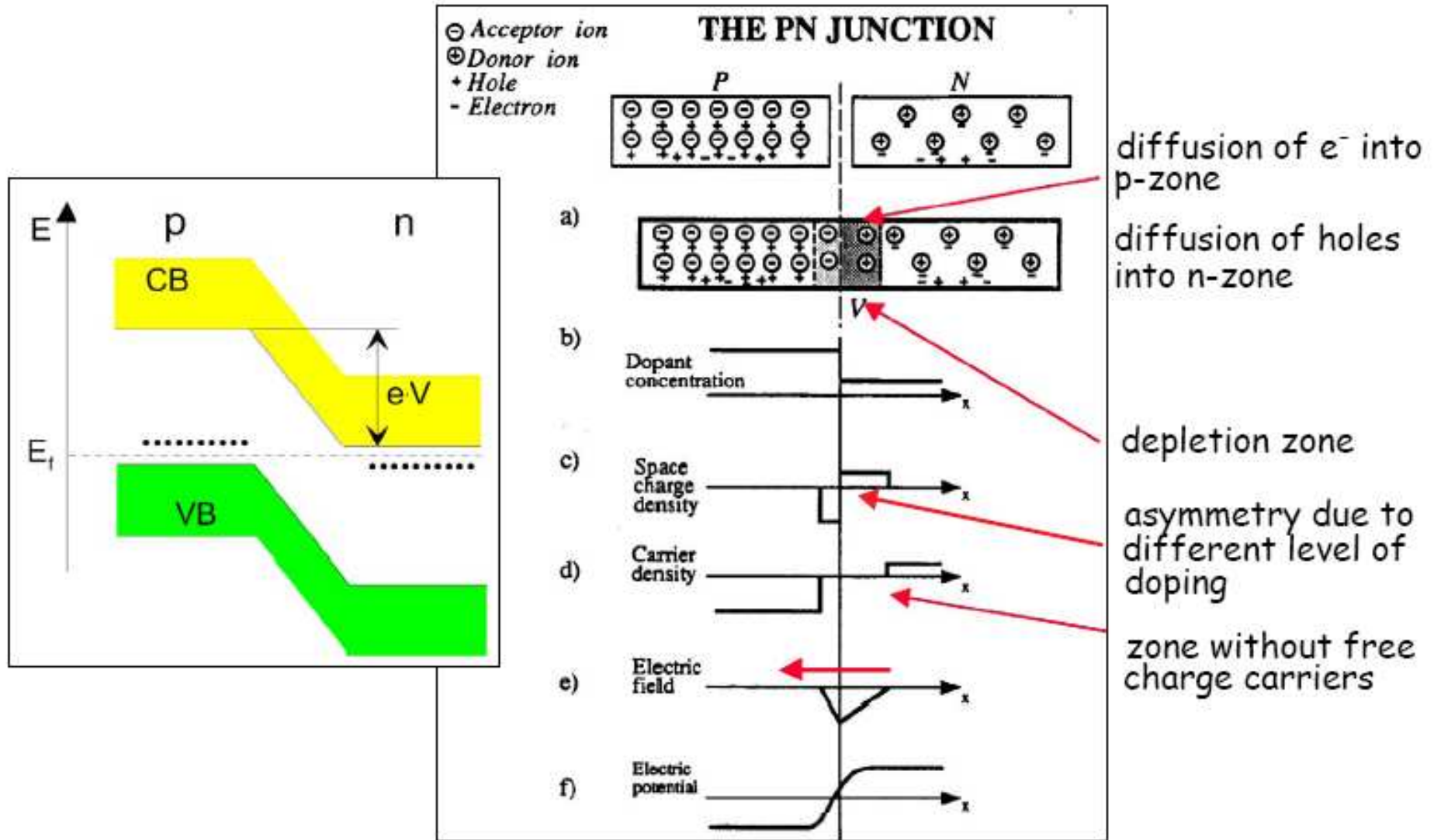
Gli elettroni diffondono nel p , le lacune nell'n
 → si crea una differenza di potenziale → la diffusione si ferma

Regione di svuotamento non ci sono portatori di carica liberi.

Nessuna carica libera nella regione di svuotamento

(A. Peisert, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific)

pn - Junction



Giunzione non polarizzata

L'altezza della barriera di potenziale 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:

$$x_n = \left(\frac{2\epsilon V_d}{q N_d \left(1 + \frac{N_d}{N_a} \right)} \right)^{1/2}$$
$$x_p = \left(\frac{2\epsilon V_d}{q N_a \left(1 + \frac{N_a}{N_d} \right)} \right)^{1/2}$$

Si è risolta l'equazione di Poisson $d^2V/dx^2 = -\rho(x)/\epsilon$ e si è assunta una densità di carica $\rho(x)$ uniforme .

$$\rho(x) = qN_D \text{ per } 0 < x < x_n$$

$$\rho(x) = qN_a \text{ per } -x_p < x < 0$$

Se $N_a \gg N_d$ $x_n \gg x_p$ la zona di svuotamento è quasi tutta dal lato della giunzione n (meno drogata) quindi:

$$d \approx x_n \approx \left(\frac{2\epsilon V_d}{q N_d} \right)^{1/2}$$

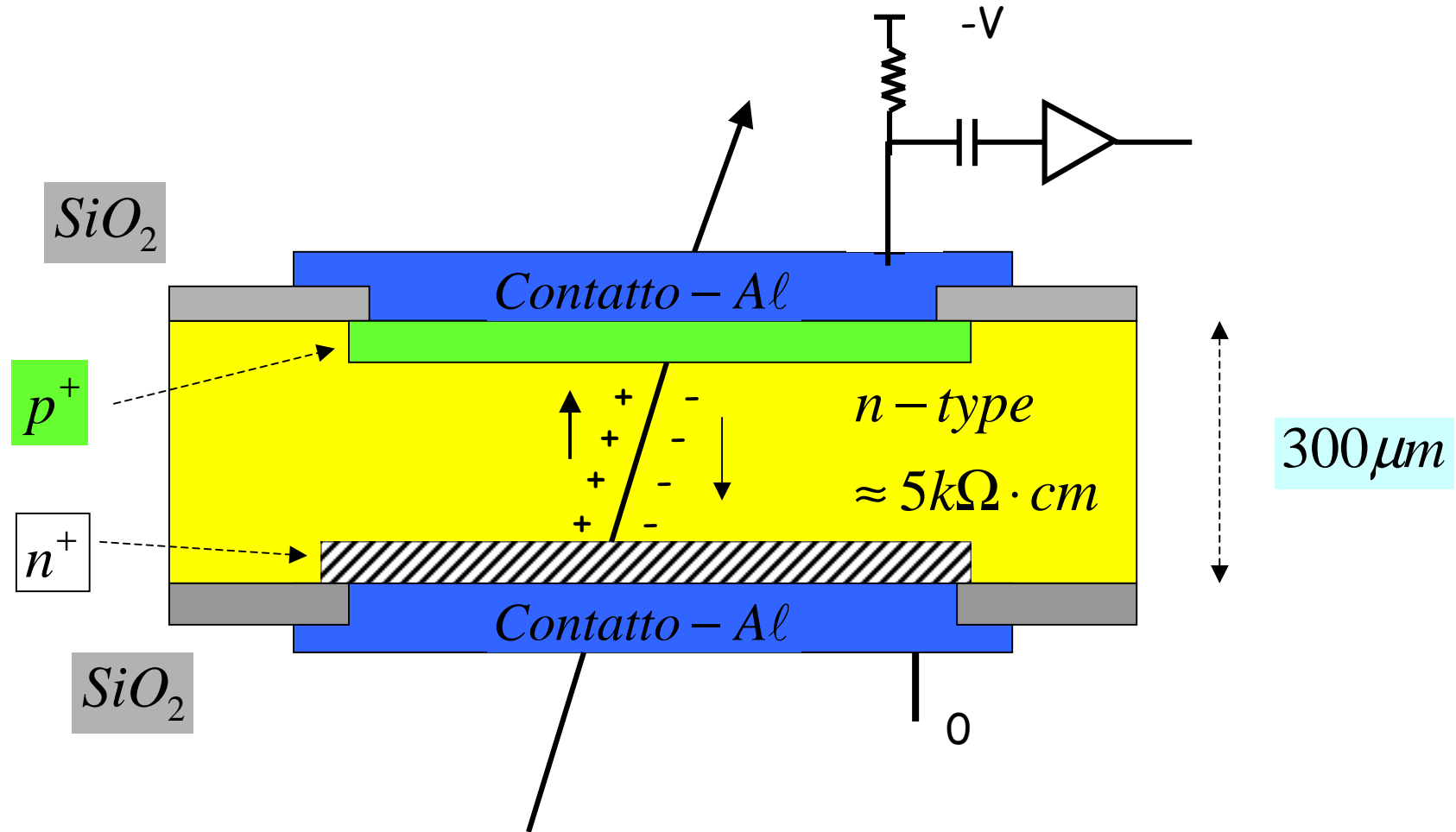
Giunzione polarizzata inversamente come rivelatore di particelle

- Polarizzando inversamente il diodo ($V_B \sim 100V$ a n+) → la zona di carica spaziale in cui e' presente il campo elettrico si estende → 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 → corrente rivelabile
- La zona svuotata dai portatori e' la parte attiva del rivelatore perche' il campo $E \neq 0$

Schema di rivelatore al Silicio

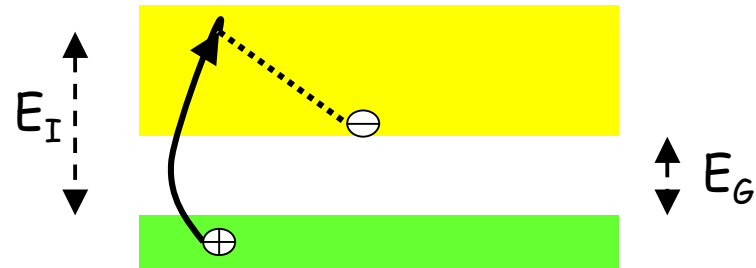
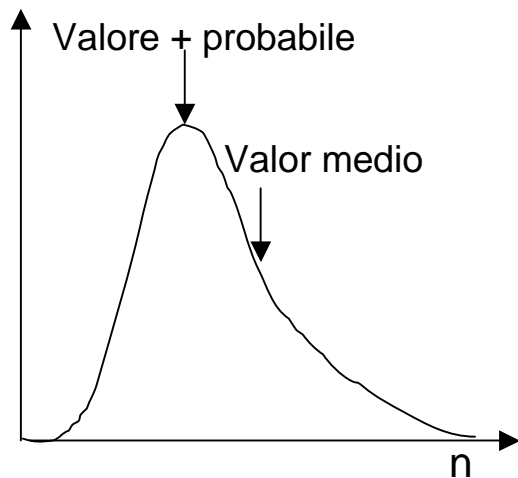


Motivazioni scelte tecniche

- **Silicio n-type 5 k Ω ·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 SiO₂** : Passivazione evita che alla superficie del Si restino legami non chiusi che formano centri di intrappolamento e generazione
- **300 um**: tecnologia elettronica OK (300-1000um)

Rilascio di carica nel Silicio

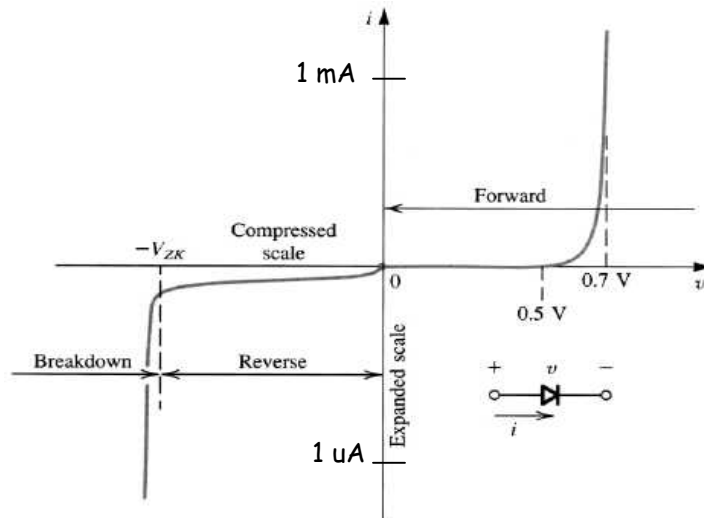
- $E_I = 3.6 \text{ eV} (> E_G)$
 - transizioni indirette



- M.I.P. rilasciano:
 - 24000 e- / 300 um
 - Fluttuazioni di Landau

- Necessita' di
 - basso leakage
 - Elettronica a basso rumore

Contributi alla corrente di leakage



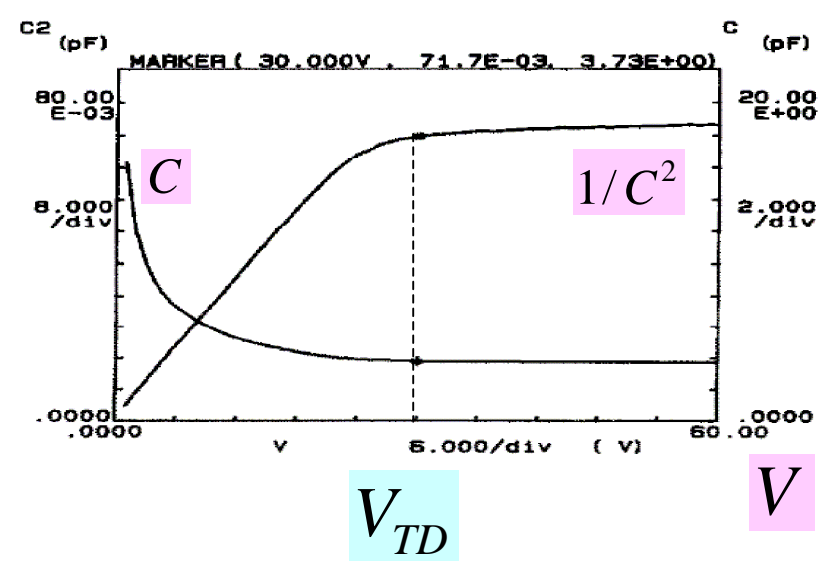
$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

The diode $i-v$ relationship with some scales expanded and others compressed in order to reveal details.

- Centri di generazione nel volume
 - $I_L \propto X_d \propto (N_d)^{1/2} \leq 10 \text{ nA/cm}^2 \cdot 300 \text{ um}$
 - Importante la qualità del materiale e del processo di fabbricazione
- Generazione superficiale: viene ridotta con
 - Ossido di buona qualità
 - Anelli di guardia che la assorbono

C-V

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{x_d} \propto \frac{1}{\sqrt{V}}$$

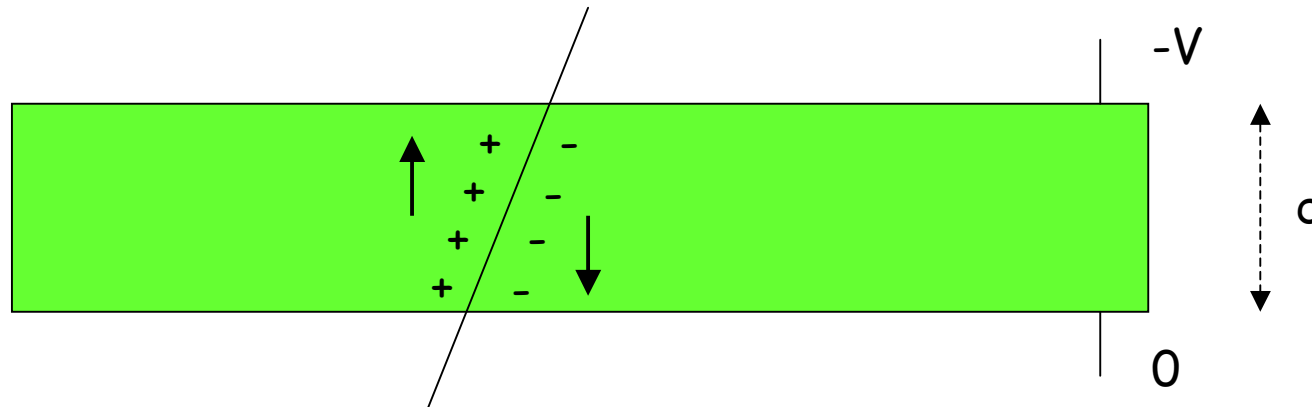


- V_{TD} = tensione di svuotamento totale
- C_D = Capacita' di lavoro del rivelatore

$$C_D = \frac{1 \text{ pF} / \text{cm} \times A}{d} = 33 \text{ pF} / \text{cm}^2 \times A \quad d = 300 \mu\text{m}$$

- Se gli elettrodi sono suddivisi ci sono altri contributi alla capacita'

Formazione del segnale



- Il moto della carica induce sugli elettrodi

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

- Tempo di raccolta (85% della carica)

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

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

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

- Il silicio e' veloce!

Rivelatori a microstrip

- Struttura geometrica e caratteristiche elettriche
- Tecnologia di produzione
- Rumore nella lettura
- Risoluzione
- Lettura sulle due facce

Schema rivelatore a strip

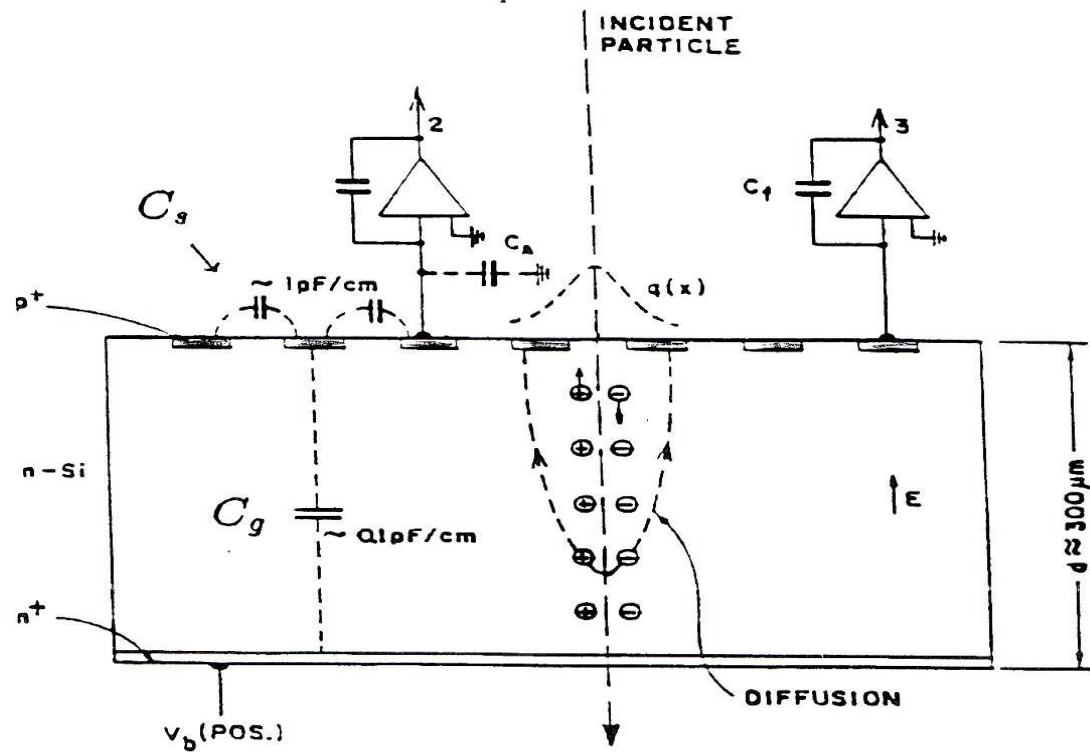
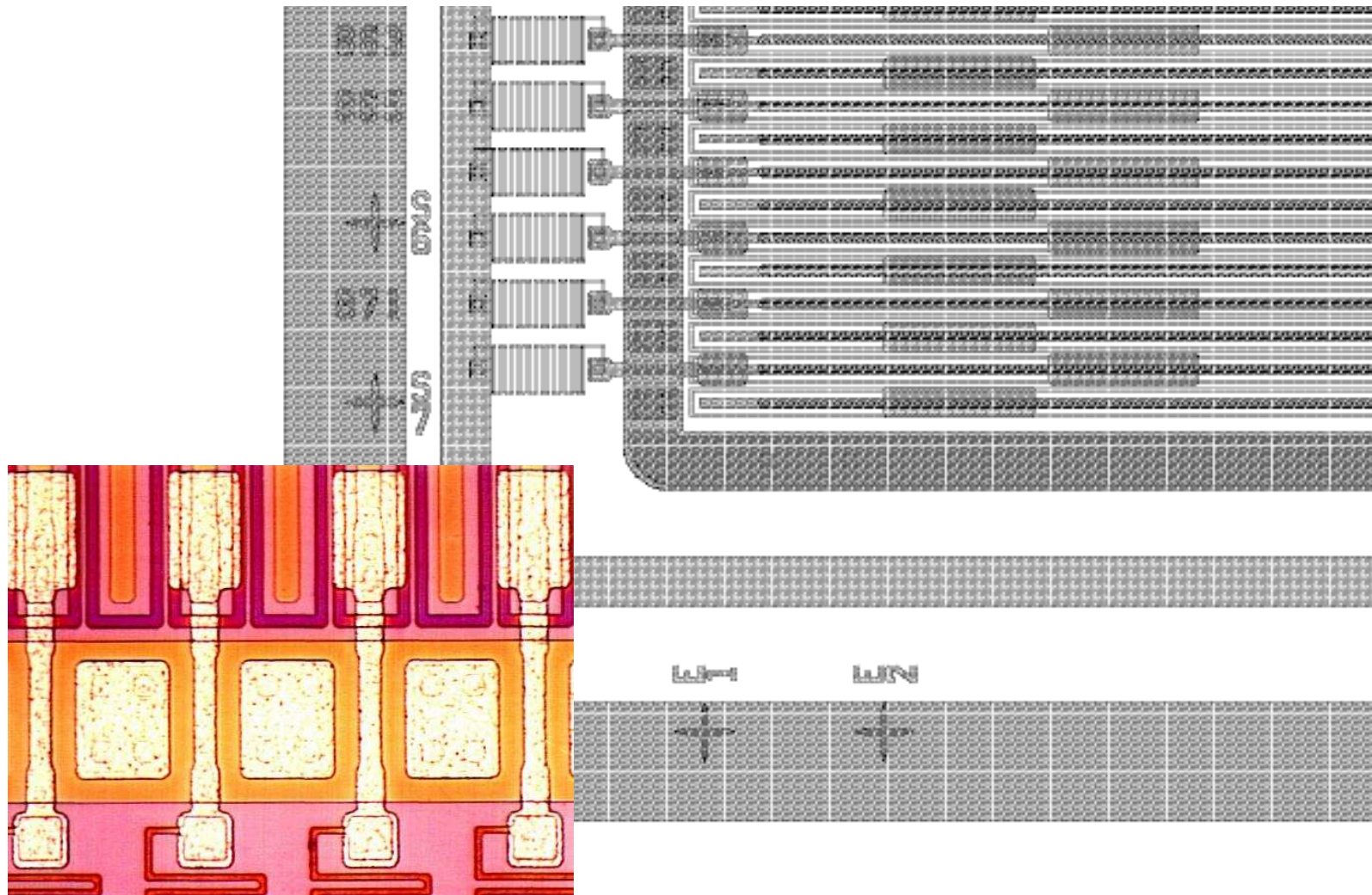


Figure 3.7: A schematic representation of a generic silicon strip detector together with the read-out electronics (from Ref. [58]). Capacitors between non-neighboring strips have been neglected.

Dettaglio maschere n+ side

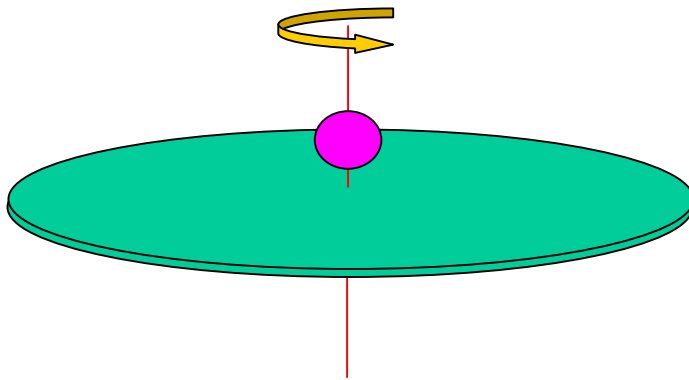


Fabrication

- Use very pure material
 - High resistivity
 - Low bias to deplete device
 - Easy of operation, away from breakdown, charge spreading for better position resolution
 - Low defect concentration
 - No extra current sources
 - No trapping of charge carriers
- Planar fabrication techniques
 - Make p-i-n diode
 - pattern of implants define type of detector (pixel/strip)
 - extra guard rings used to control surface leakage currents
 - metallisation structure effects E-field mag \Rightarrow limits max bias

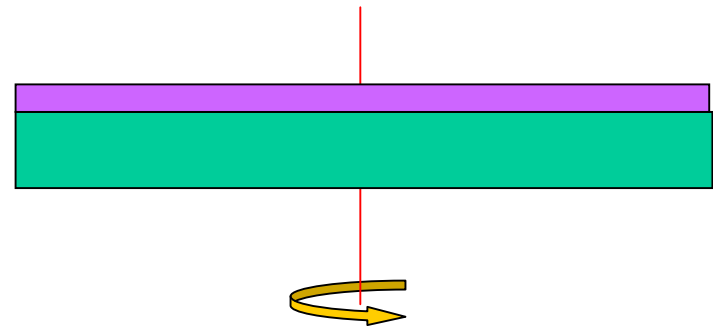
Fabrication

- Key to use of Si is the processing
- Photolithography



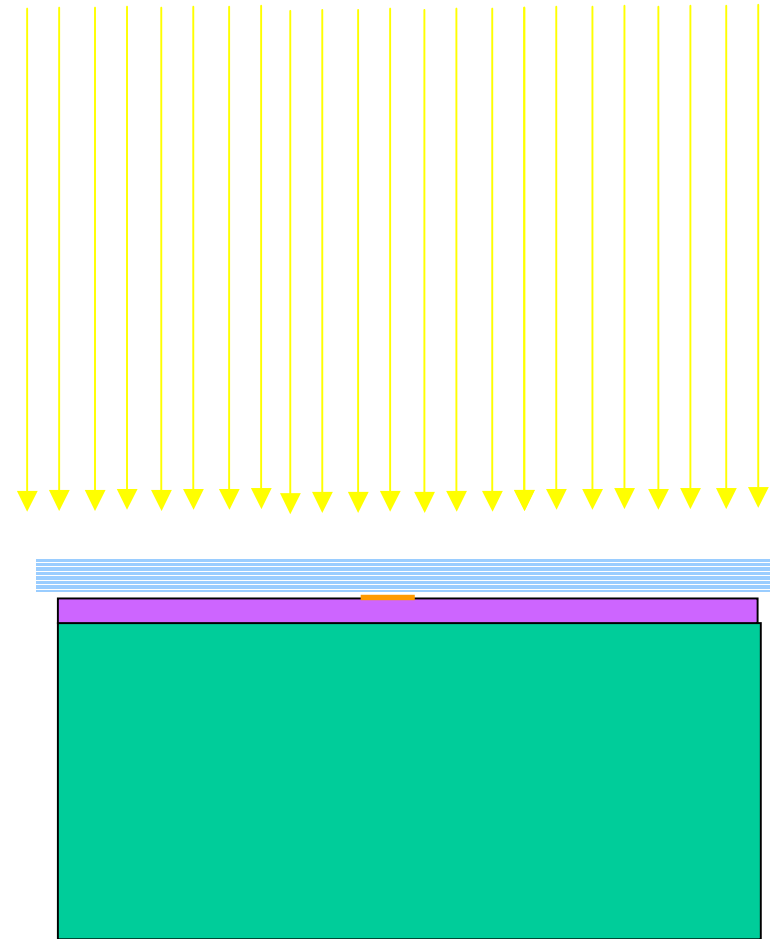
Organic Photoresist usually “spun” on

Photoresist forms a layer a few microns thick in 30s



Patterning

- Photoresist exposed using a "mask"
- Mask contains the design and is produced with e-beam lithography
 - feature size down to 0.25microns
- Negative or Positive



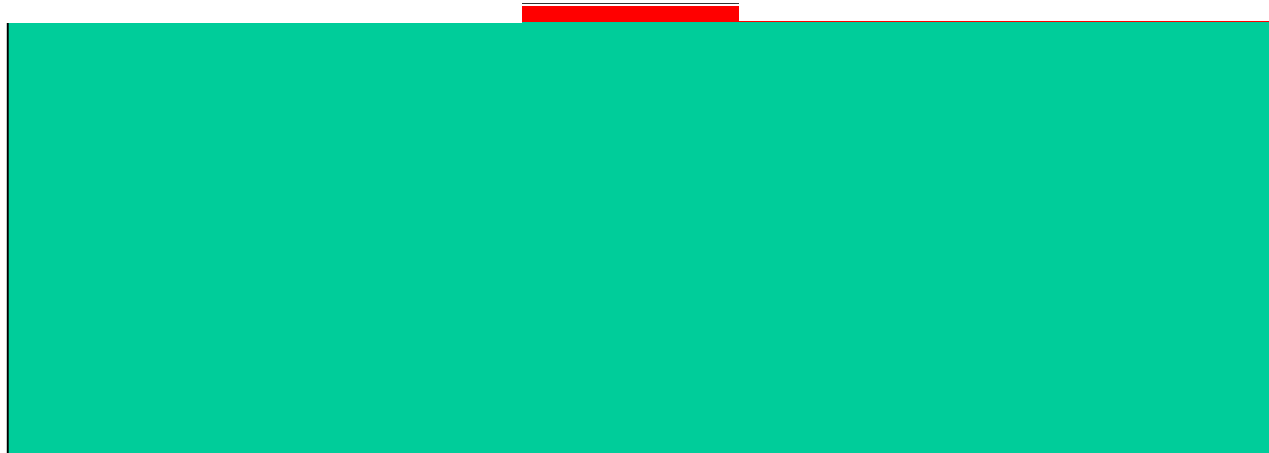
Etching

- Negative Process
- Chemical etch
 - exposed part unaffected by etch
1
- Exposed pattern may be removed later
 - second etch



Example: Aluminium line

- Deposizione Alluminio
- Deposizione Fotoresist
- Esposizione pattern su fotoresist
- Rimozione: resist , Alluminio non ricoperto, resist residuo



Fabrication steps

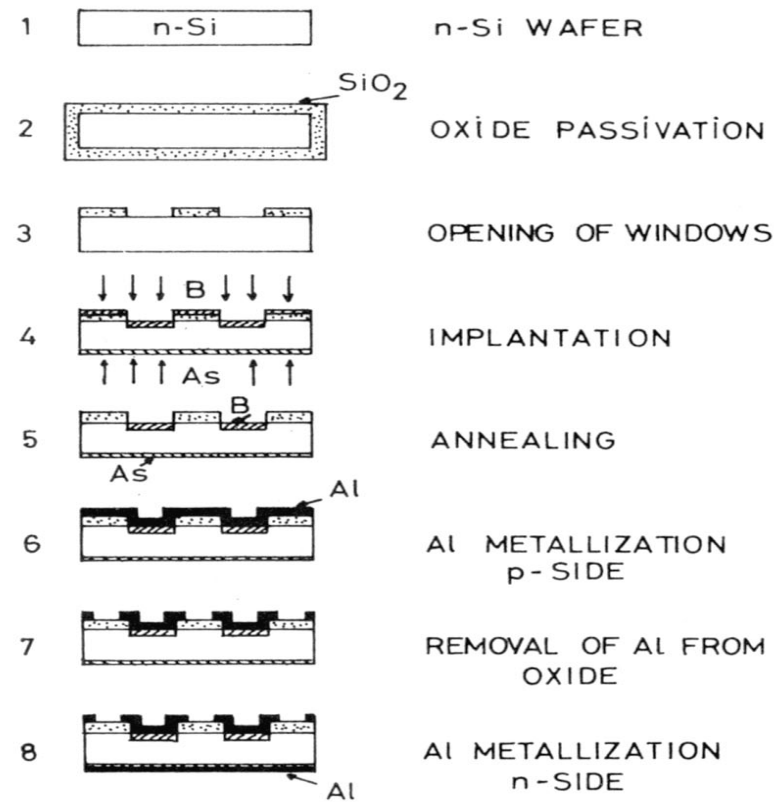
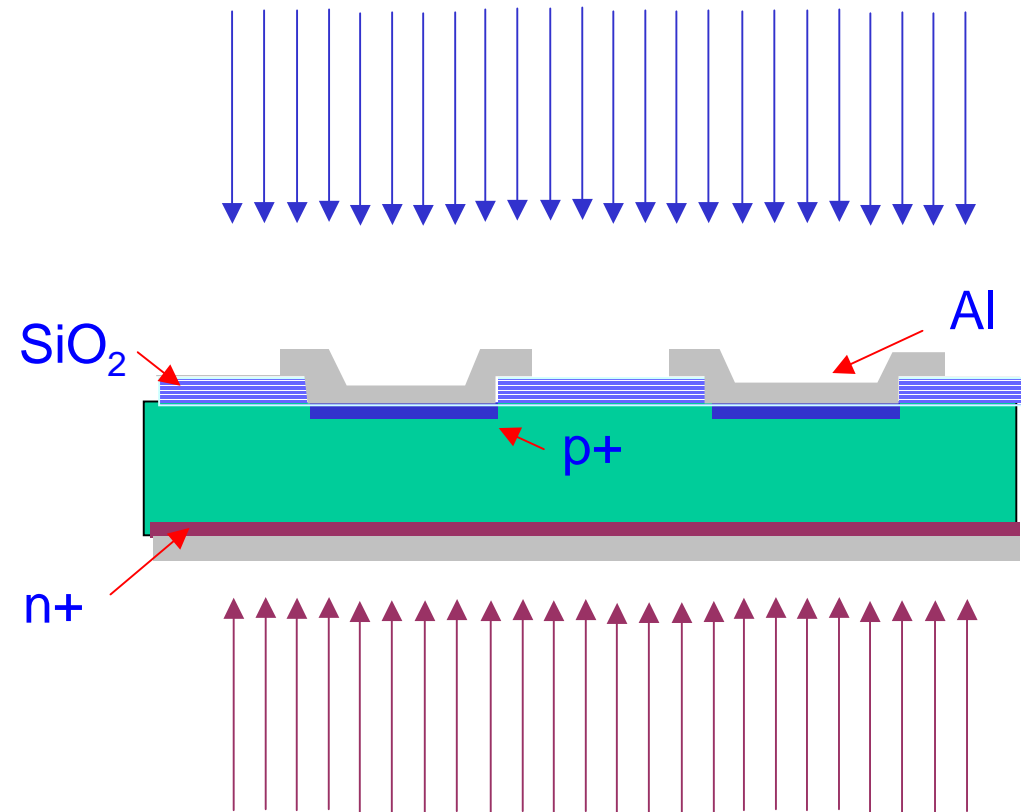


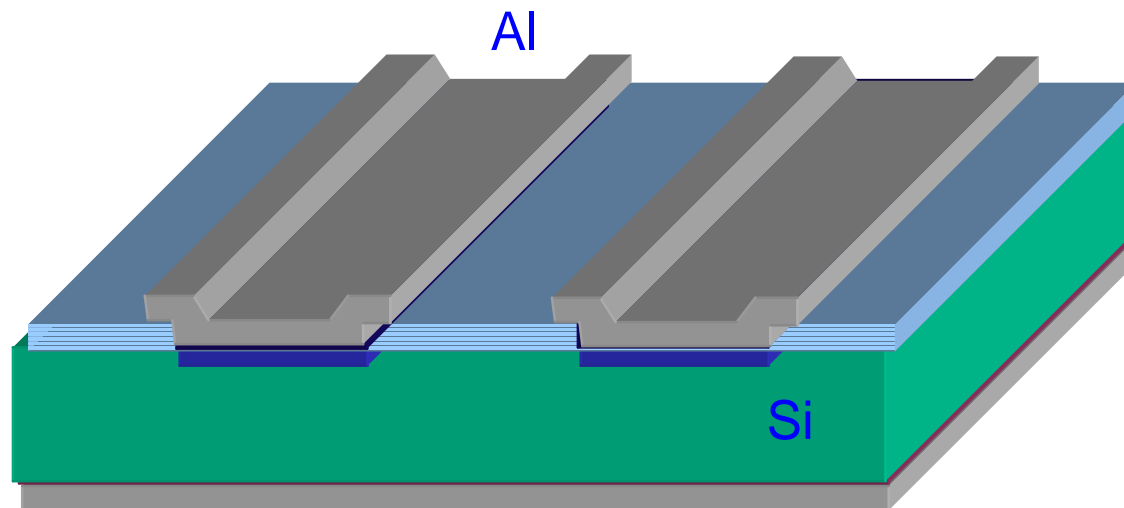
Fig. 1 : Successive steps of the manufacturing process of passivated ion-implanted silicon detectors

Simple Strip Detector

- Oxide passivation
- Windows
- Doping
 - B
 - As
- Al Metallization
- Al patterning
- Rear Contact



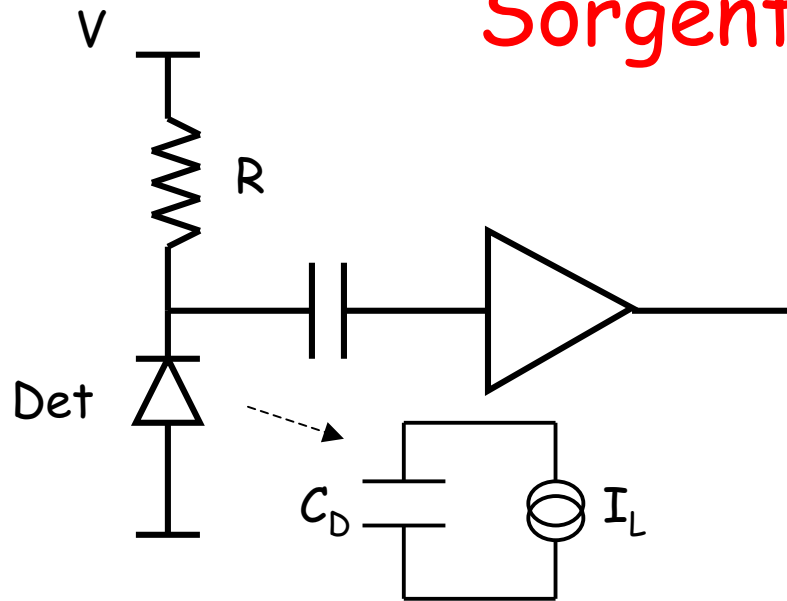
2D strips



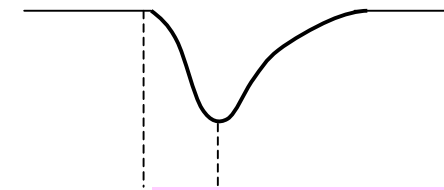
Fabrication

- Tricks for low leakage currents
 - low temperature processing
 - simple, cheap
 - marginal activation of implants, can't use IC tech
 - gettering
 - very effective at removal of contaminants
 - complex

Sorgenti di rumore



Schema di lettura



$\tau_p = \text{peaking - time}$

- Shot Noise $ENC = \sqrt{\frac{I_L \cdot \tau_p}{q}}$

Andamento con τ_p

- Thermal Noise $ENC = \sqrt{\frac{kT \tau_p}{R}}$

- Preamplifier Noise $ENC = a + b \cdot C_D$

$b \propto 1/\tau_p \approx 10 \div 30 e^- / pF$

Risoluzione (90°)

- Lettura digitale (SI/NO)
 - Distribuzione uniforme nell'area sottesa da una striscia

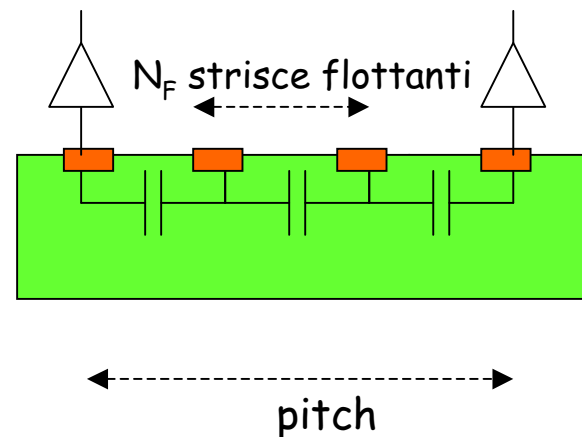
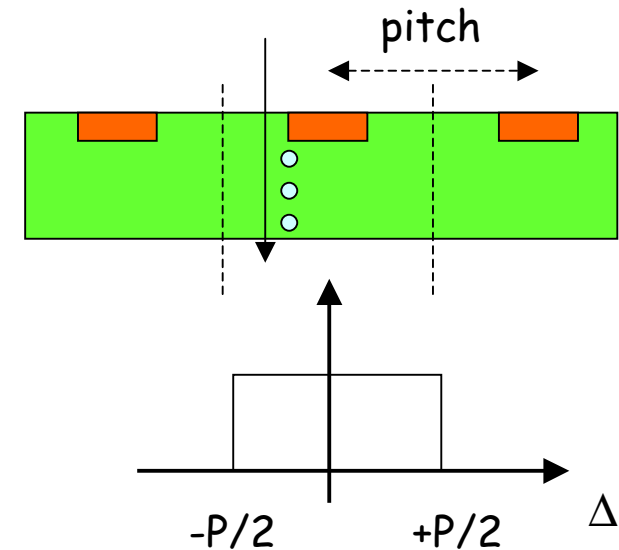
$$\sigma = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

- Probabilità di avere Δ ($=x_{\text{mis}} - x_{\text{inc}}$), con illuminazione uniforme

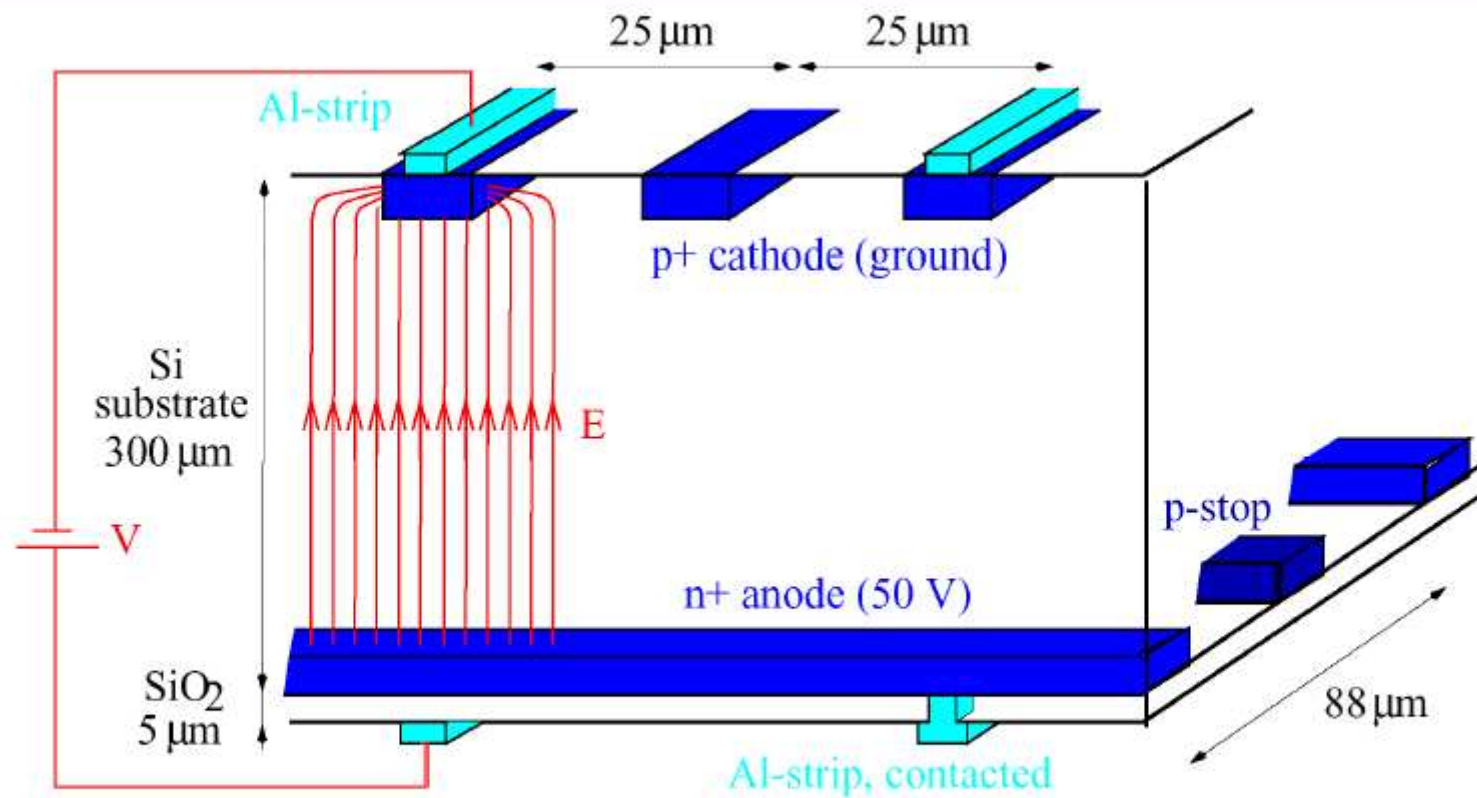
- Divisione di carica con lettura analogica

$$\sigma^2 = \left(\frac{p}{S/N} \right)^2 + \left(\frac{p/N_F}{\sqrt{12}} \right)^2$$

- Permette di avere buone risoluzioni senza divergere con i canali di lettura



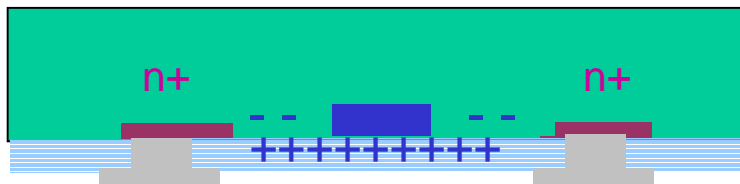
Double sided Readout



Make use of drift **electrons**: second coordinate without additional dead material !

Rivelatori a doppia faccia

- Si raccolgono sia buche che elettroni
 - Minor materiale a parita' di informazioni
 - Maggiore complessita' tecnica
 - Maggior costo
- Non basta suddividere l'elettrodo sul lato posteriore a causa dell'accumulo di carica superficiale

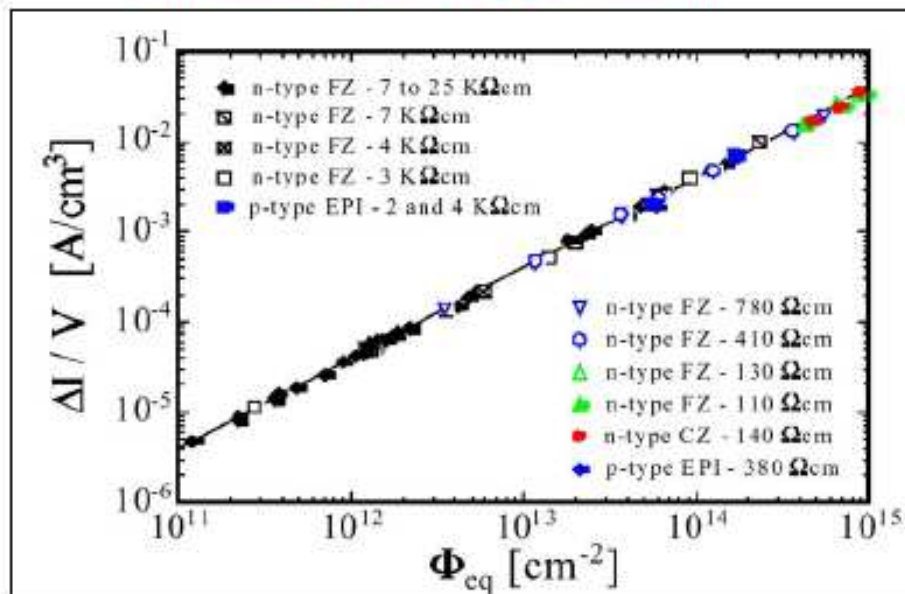


p-stops

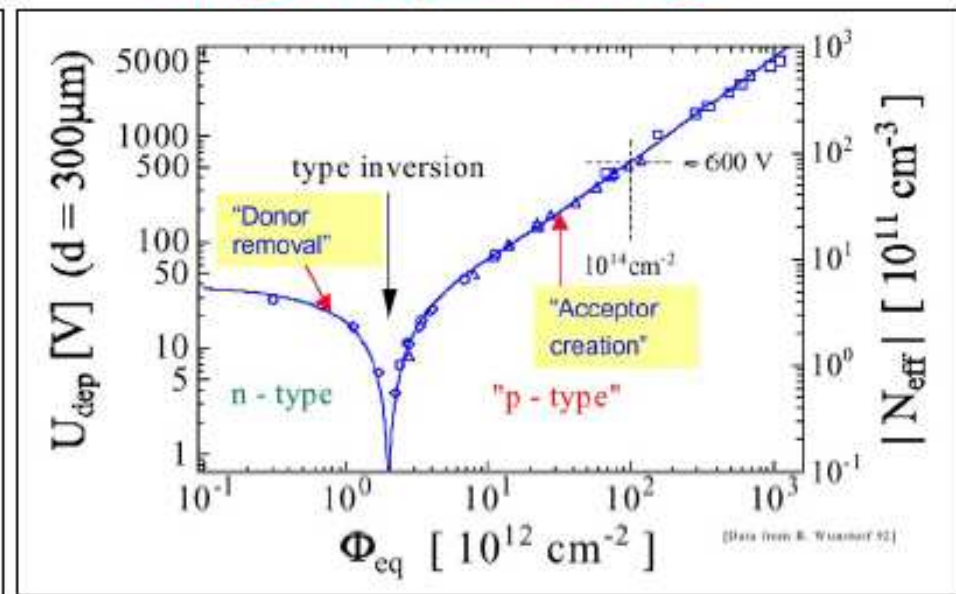
- Soluzione sviluppata a Pisa ('86): strip p+ per interrompere lo strato di accumulazione di e- che cortocircuiterebbe tutte le strip n+

Consequences of Radiation Damage in Silicon

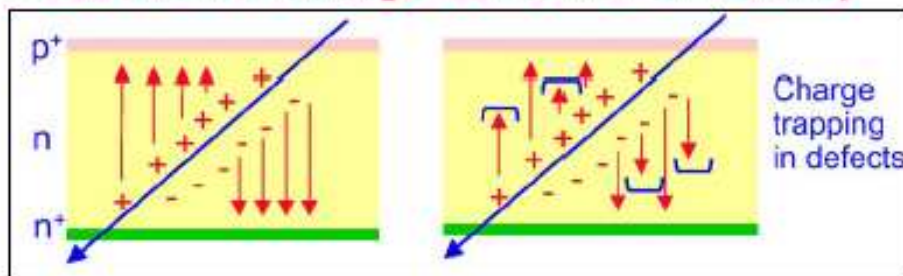
Increase of leakage current



Change of depletion-voltage



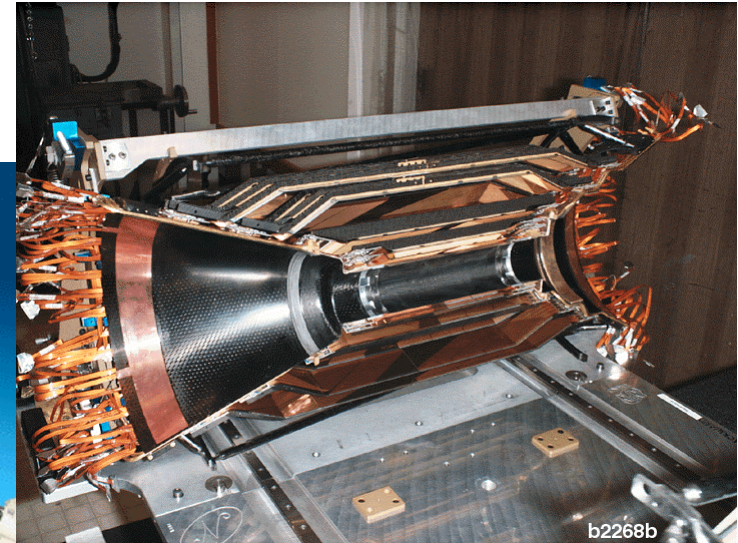
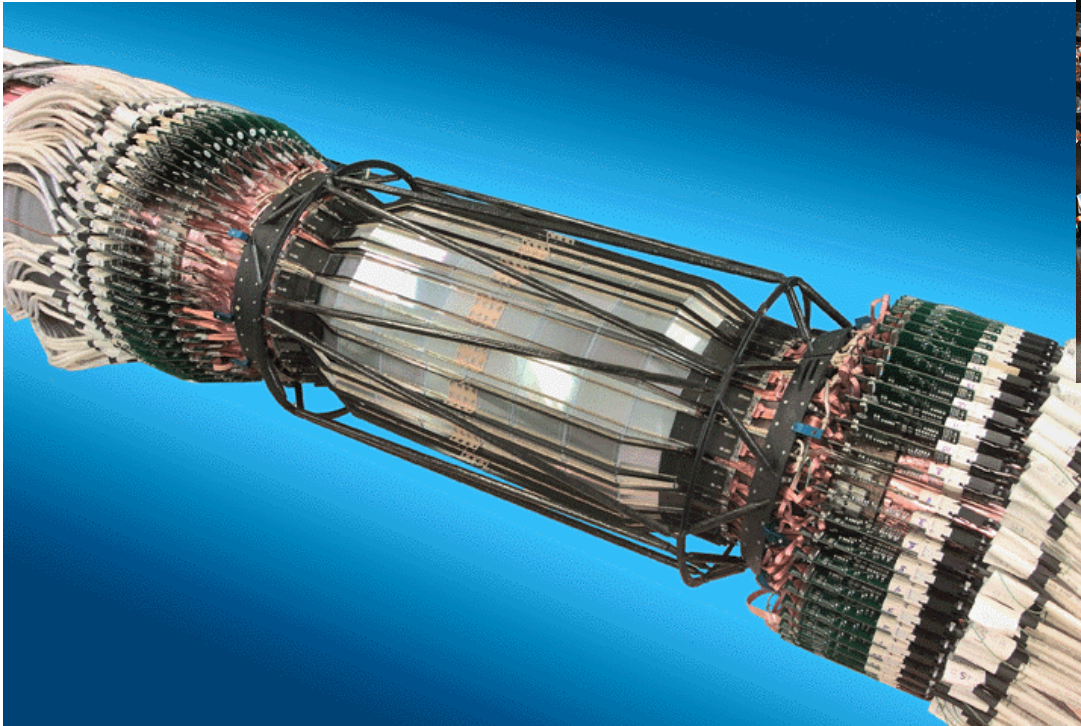
Reduction of charge collection efficiency



Counter measures:

- geometrically: develop sensors which can stand higher depletion voltages
- environment: cooling of sensors ($\approx -10^\circ\text{C}$)
 - \rightarrow slows down "reverse annealing"
 - reduced leakage currents

Trackers for the B-factories: the BaBar Silicon Vertex Tracker



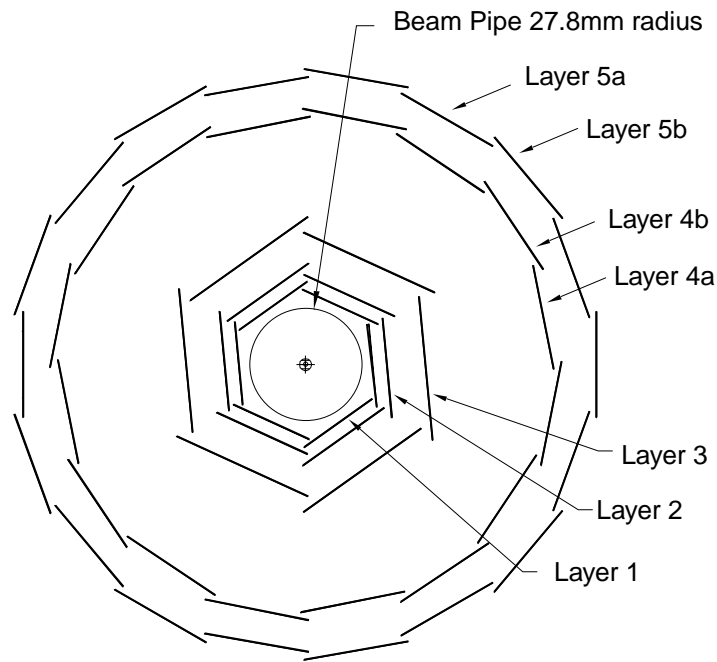
Physics Requirements

B-factories primary goal:

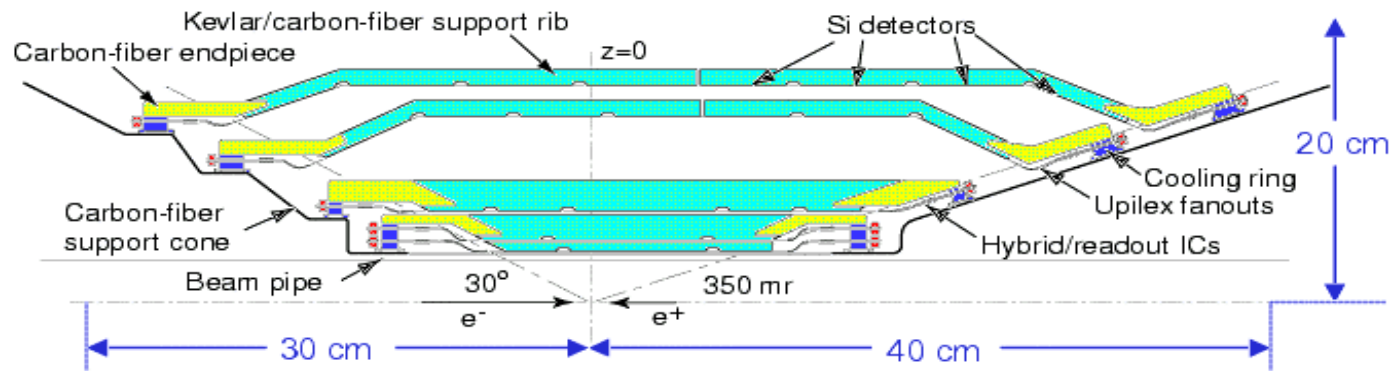
- Study of CP asymmetries in B decays (Branching Ratios $\sim 10^{-4}$ - 10^{-5})
- Overconstrain CKM matrix parameters

Main SVT physics requirements:

- SVT standalone tracking for $p_{\perp} < 120 \text{ MeV}/c$ with high efficiency
- Single vertex resolution along z-axis better than $80 \mu\text{m}$ ($\langle \Delta z \rangle$ of B mesons about $250 \mu\text{m}$)
- Radiation hard up to 2 Mrad



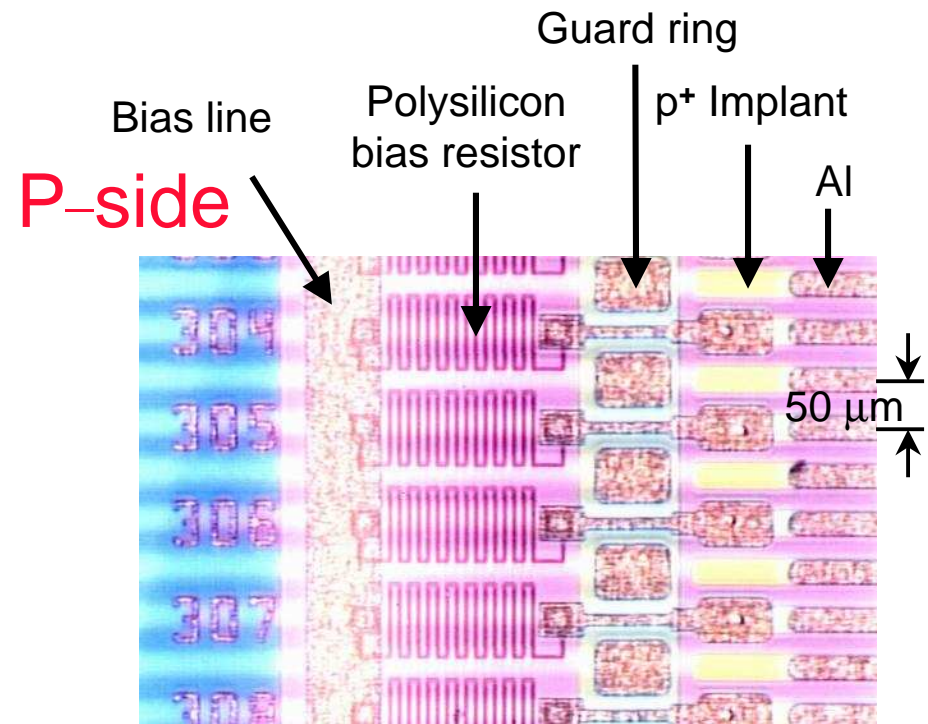
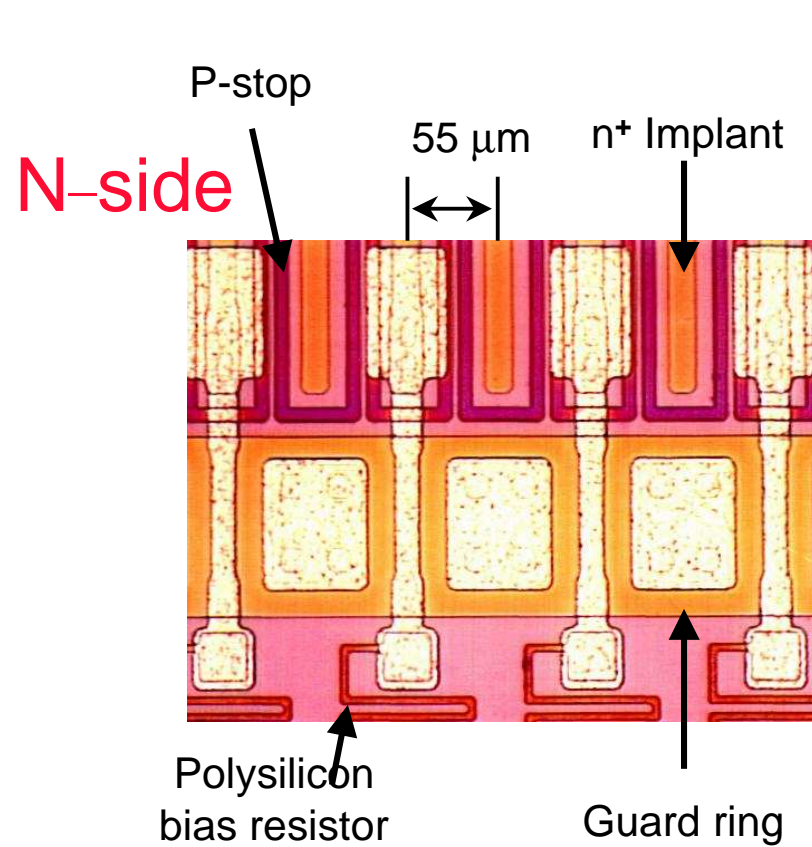
SVT Layout



PEP-II constraints:

- Permanent (B1) dipole magnets restrict polar acceptance: $17.2^\circ < \theta < 150^\circ$
- Bunch crossing period: 4.2 ns (almost continuous interactions !)
- Radiation hardness

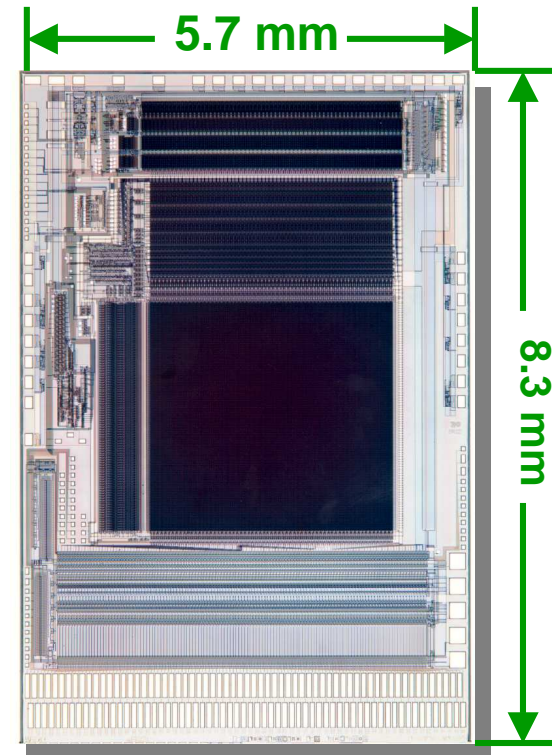
- Microstrip silicon detector; 5 double-sided layers
- Completely independent mechanically from BaBar
- Layer 1-3 (barrel-shaped) for a precise measurement of track impact parameter
- Layer 4-5 (arch shaped) for pattern recognition and low p_t tracking
- $X_0(\text{Si}) = 9\text{cm}$: multiple scattering is the limiting factor to the resolution
- 150 k channels, 340 wafers (6 different models)



- Double-sided, AC-coupled Si
- Integrated polysilicon bias resistors
- 300 μm n-type (4-8 kΩcm)
- P+ and n+ strips perpendicular to each other

The AToM Chip (A Time over Threshold Machine)

- 128 Ch's/chip
- Rad-Hard bulk 0.8 μm CMOS process (HONEYWELL 4")
- Capable of simultaneous:
 - Acquisition
 - Digitization
 - Sparsified Readout
- No common mode noise:
 - separation analog/digital parts in the chip layout
 - proper system shielding
- Info from AToM: Timestamp T_0 and TOT
- Internal charge injection
- Digital-based diagnostics



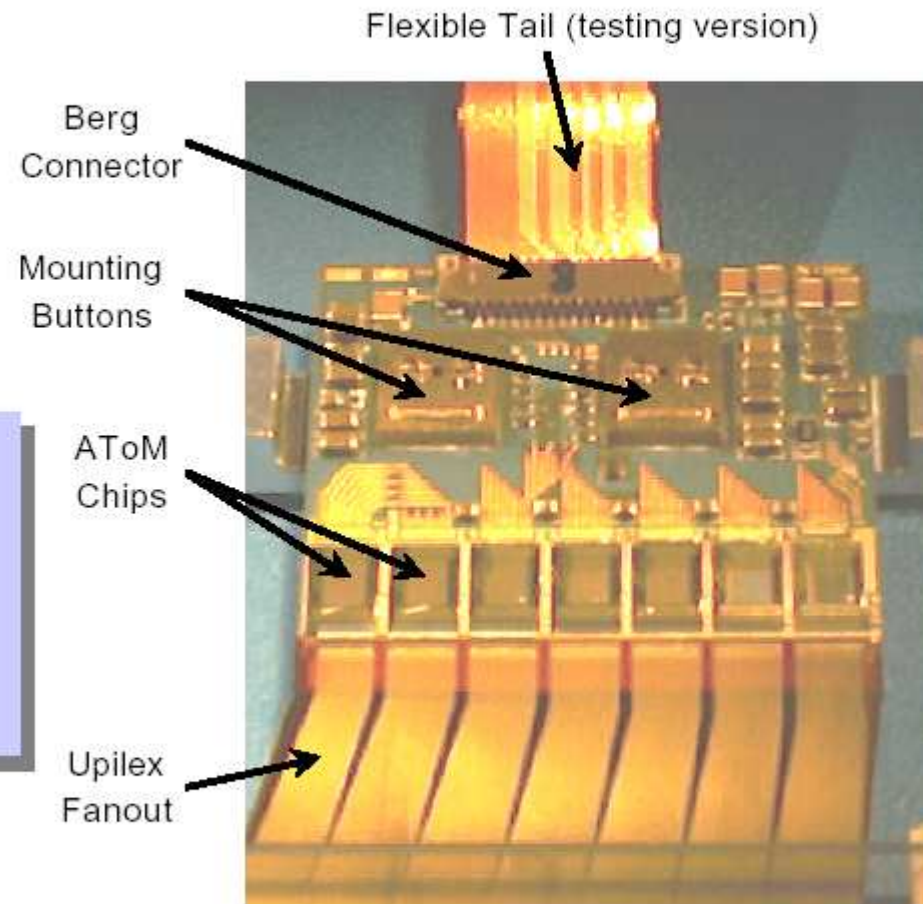
SVT High Density Interconnect

Functions:

- Mounting and cooling for readout ICs.
- Mechanical mounting point for module.

Features:

- AlN substrate.
- Double sided.
- Thermistor for temp. monitor.
- 3 different models.



Fanouts

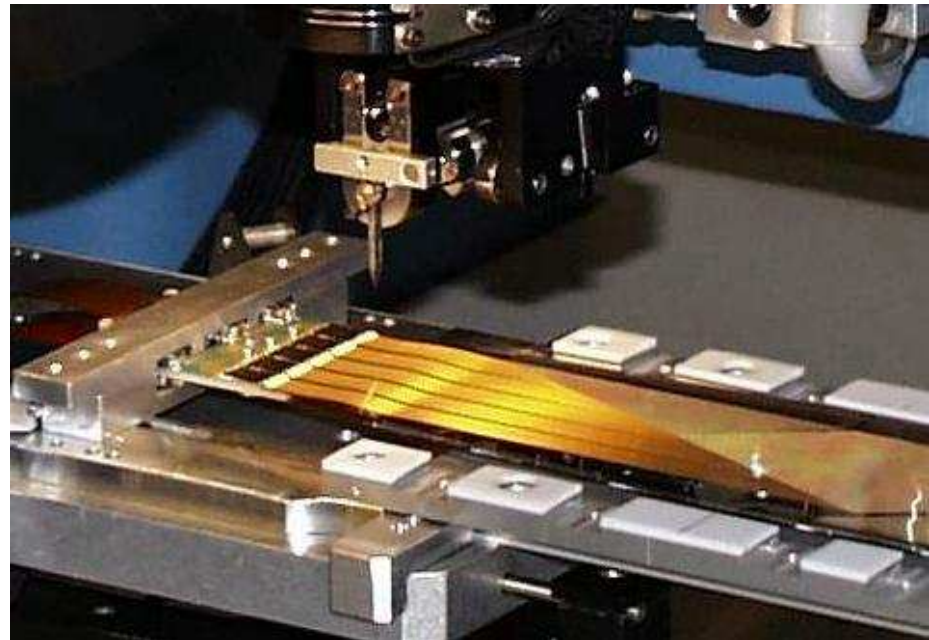
Fanout circuits provide electrical connections between the detector strip and the front-end chip

Properties:

Cu (Cr and Au) layer on an Upilex substrate (50 μm thick, $< 0.03\%X_0$)

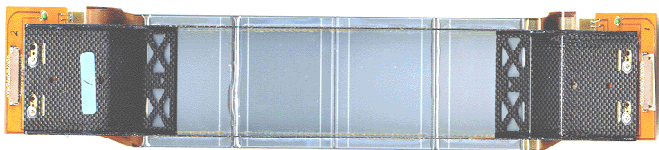
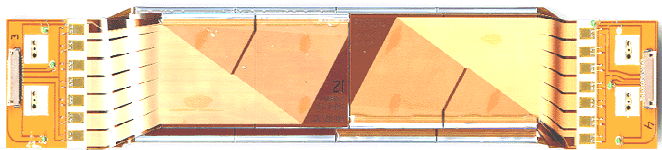
$$C = 0.52 \text{ pF/cm}$$

$$R = 2 \text{ } \Omega/\text{cm}$$

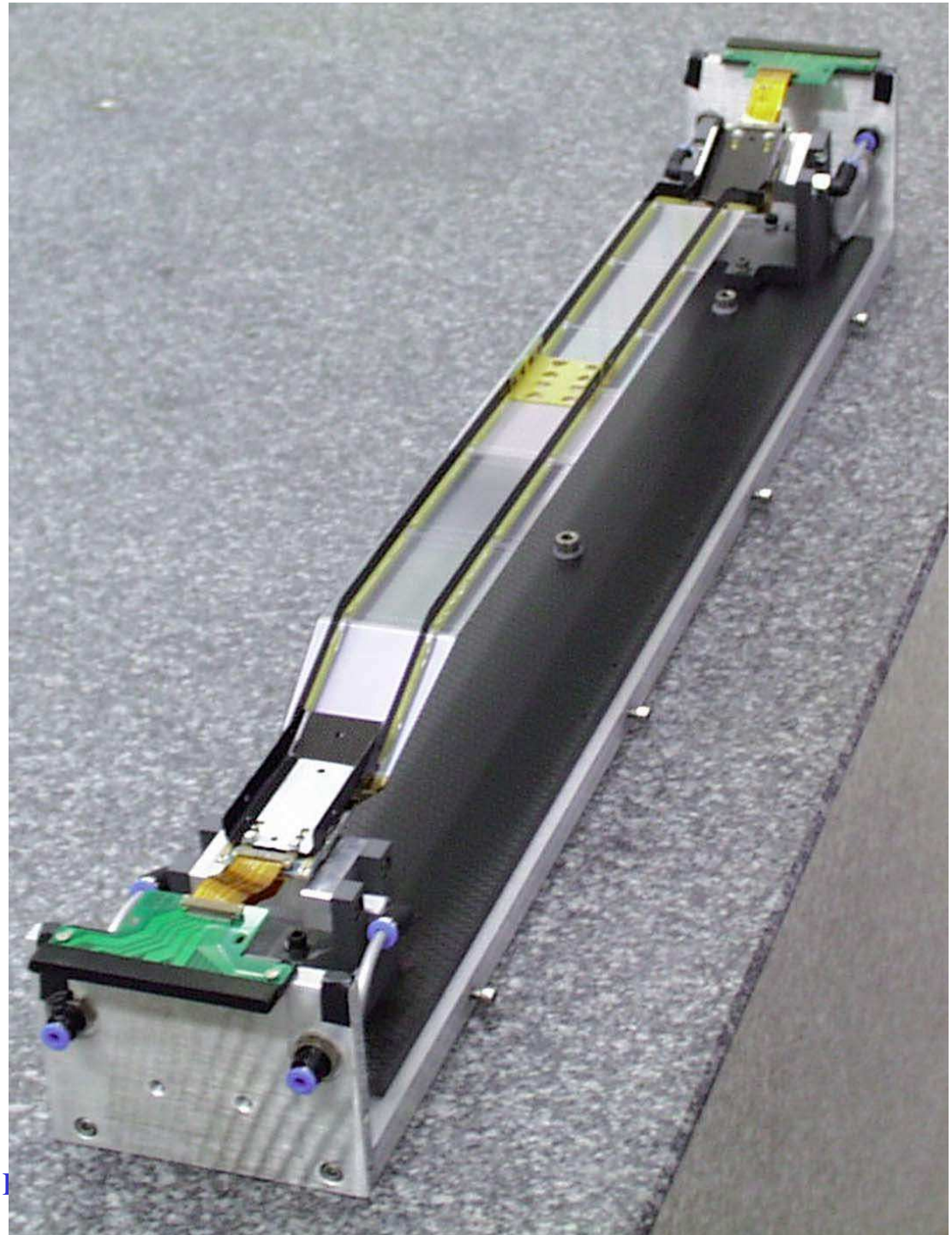


SVT Module / Layer:

L 1-2 : 6
L 3 : 6
L 4A+B : 8 + 8
L 5A+B : 9 + 9

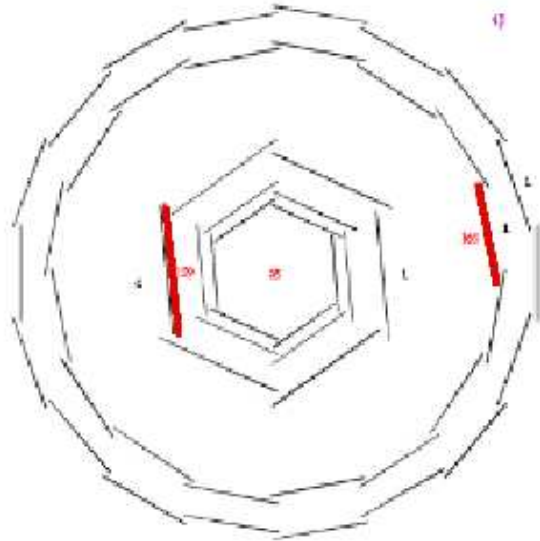


G.Rizzo

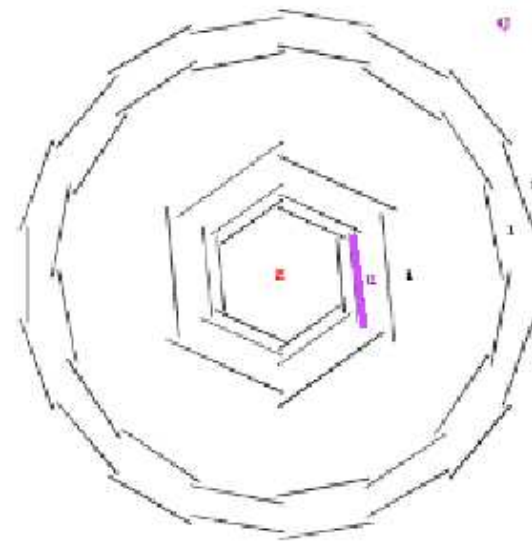


Status of modules

Forward



Backward

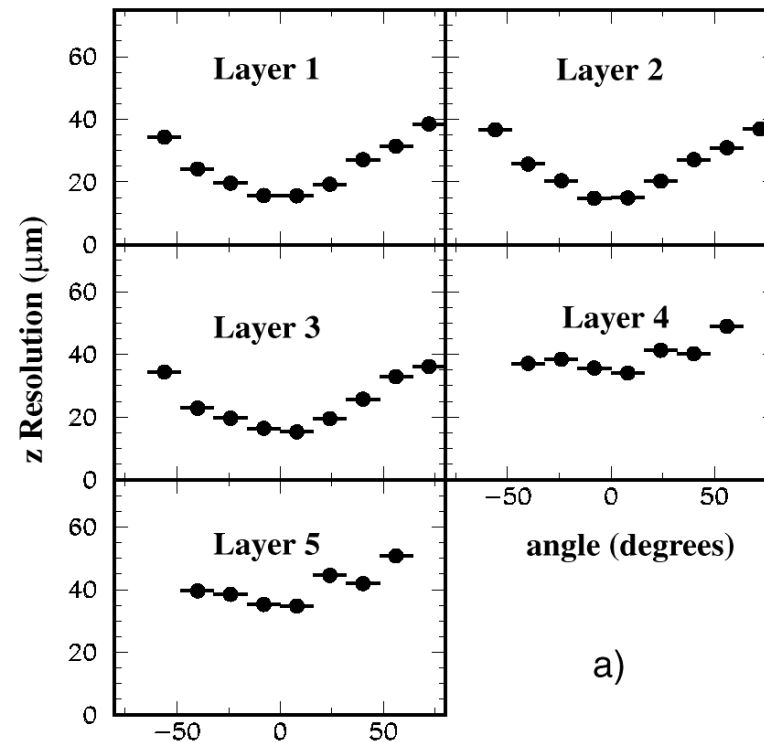
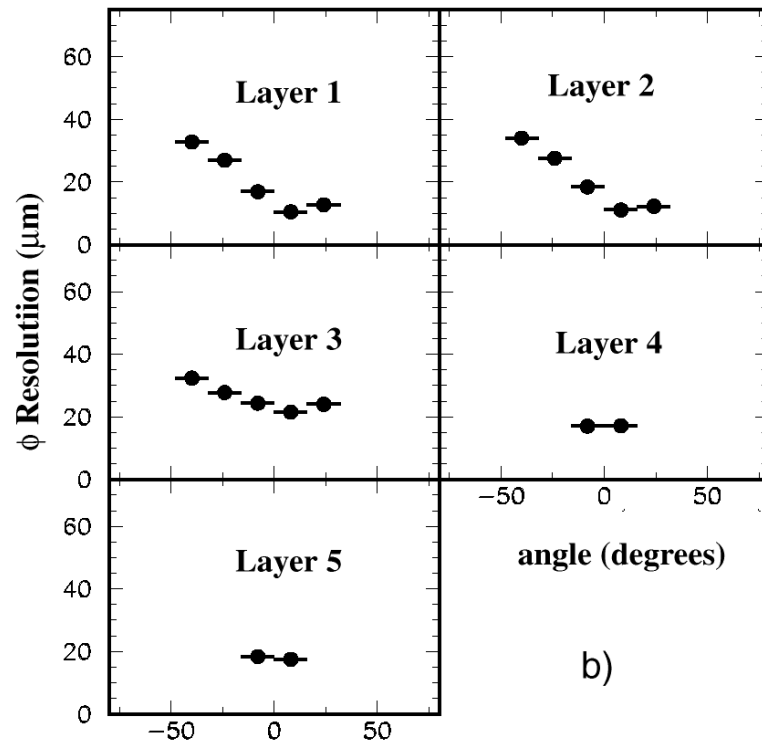


- a total of 104 half-modules (208 readout sections)
- No failures due to radiation
- Only 3 sections are not presently read-out

BaBar SVT not accessible and a shutdown to extract it requires at least four months!

Reliability/redundancy of every part is critical.

Performance - hit resolution

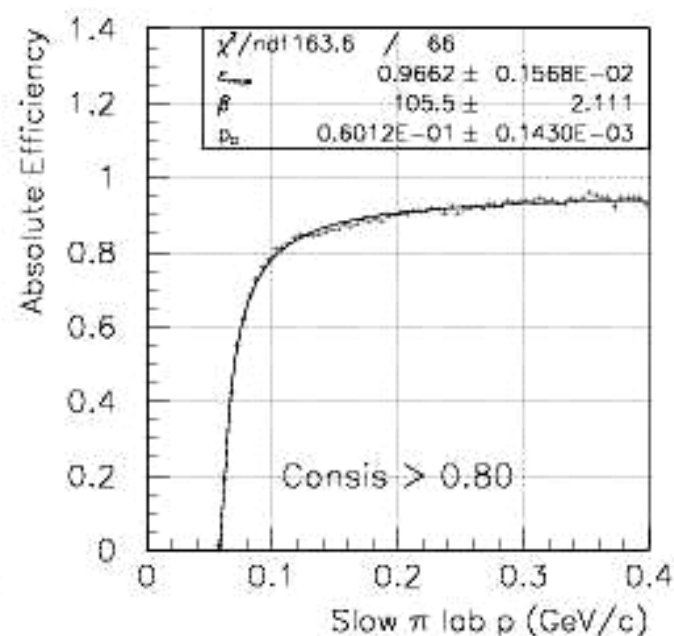
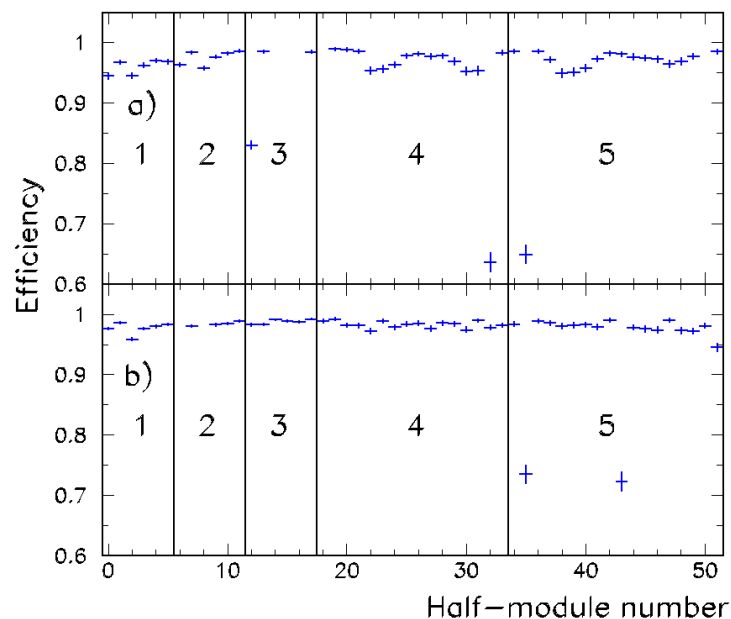


TDR target for perpendicular tracks $p > 1 \text{ GeV}$:

Layer 1-3 10-15 μm

Layer 4-5 30-40 μm

Performance - hit efficiency



Hit efficiency is typically 98%

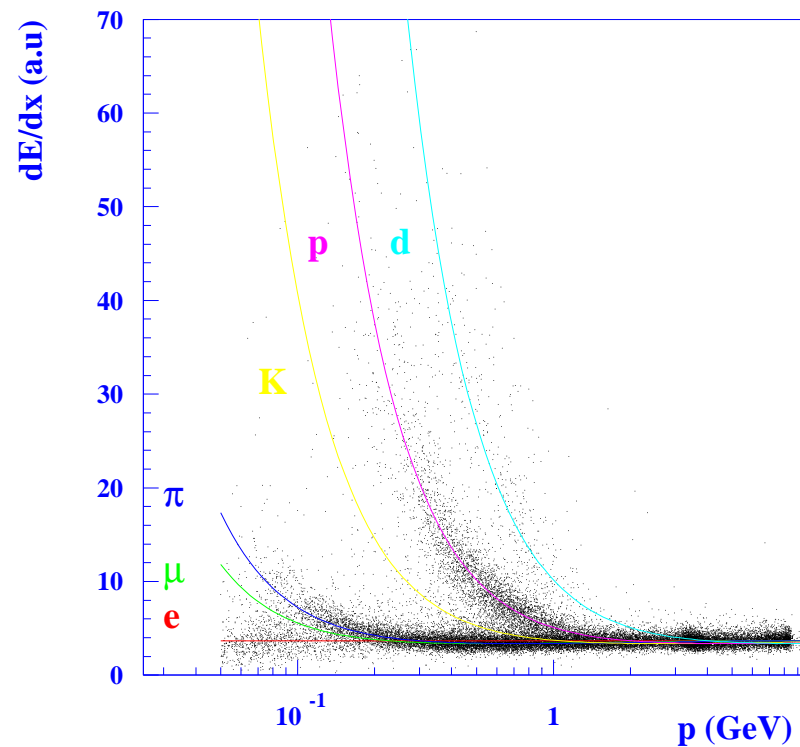
Slow pion efficiency > 70%
for $p_t > 80$ MeV/c

Performance - dE/dx

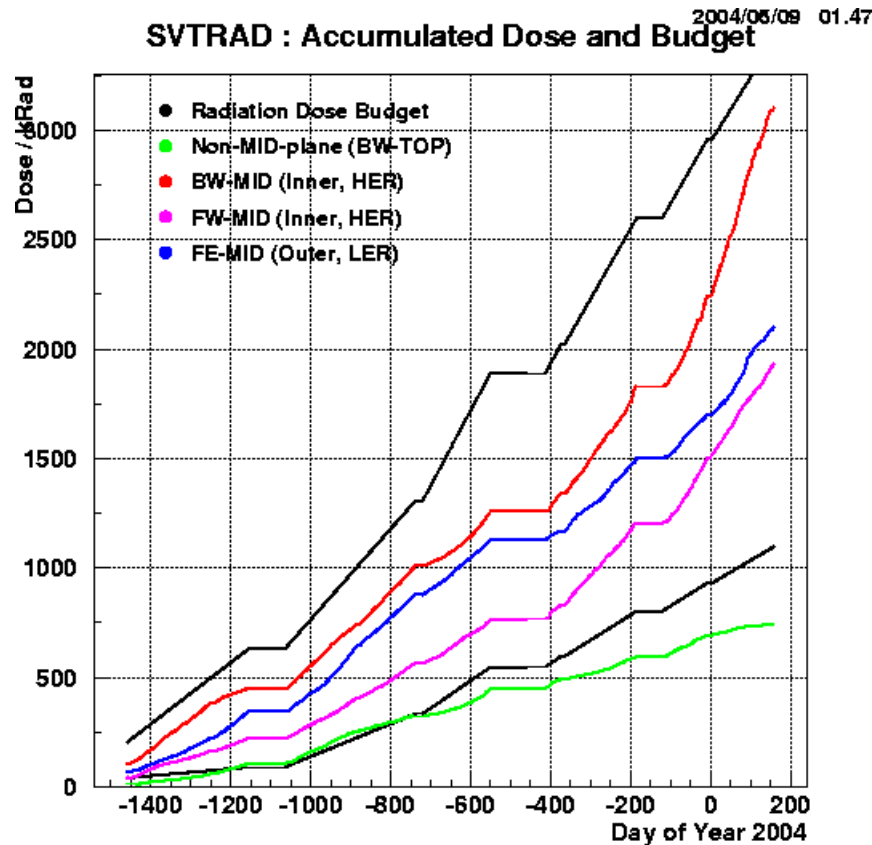
SVT dE/dx versus momentum

Use pulse height measurements to determine ionization dE/dx

2 σ separation between kaon and pions up to momentum of 500 MeV/c and between kaons and protons up to 1 GeV/c



Radiation budget



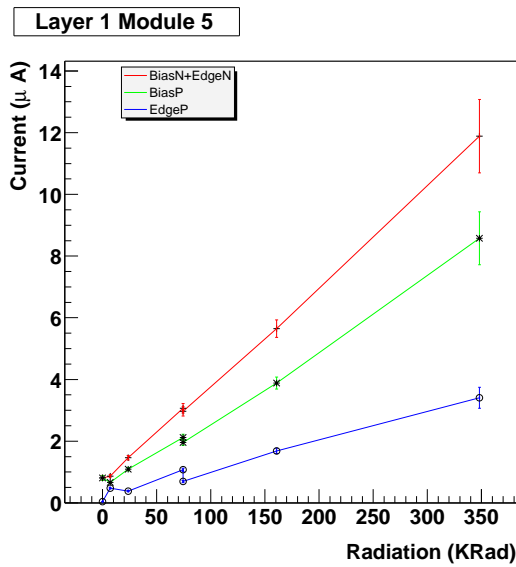
Dose rate in the interaction region is much higher than expected from design (it was 2 MRad / 10 years!)

but

The SVT has been designed keeping a big safety margin in the radiation hardness

Moral: there's no such thing as too radiation hard

Expected damage to the sensors



- Increase in leakage current

Irradiation tests at Elettra (Trieste) and SLAC

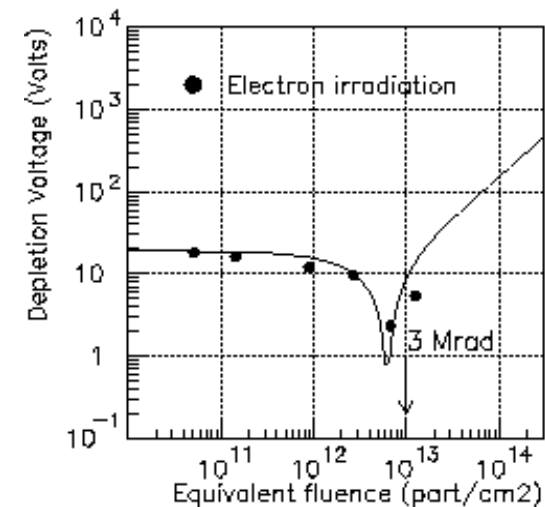
0.5-0.7 $\mu\text{A}/\text{Mrad}/\text{cm}^2$ @ $T=17^\circ\text{C}$

In full agreement with measurements on the real SVT

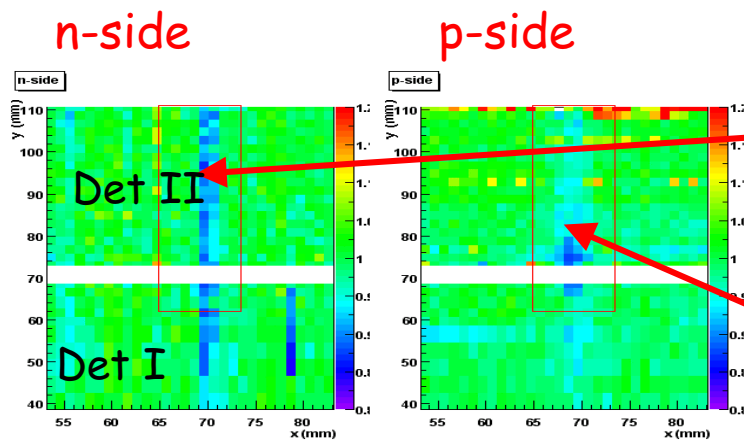
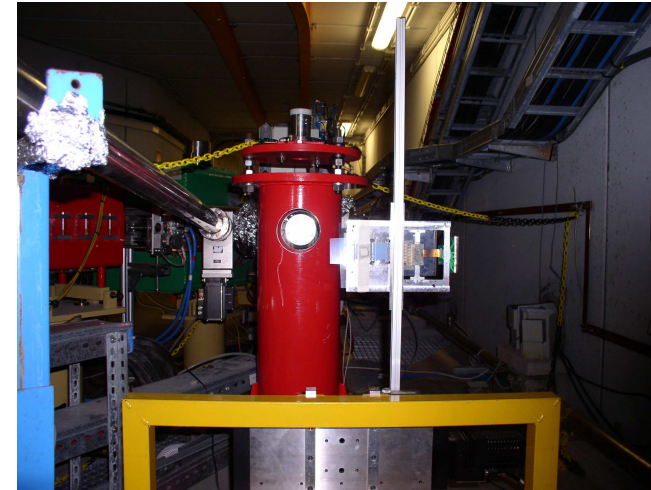
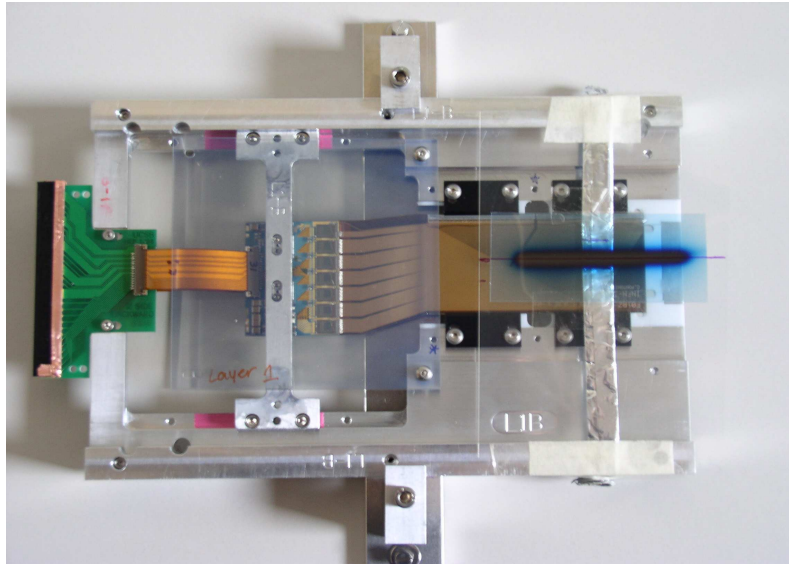
- Change in depletion voltage and type-inversion

Several test with electrons in the GeV range (0.9 to 3 GeV)

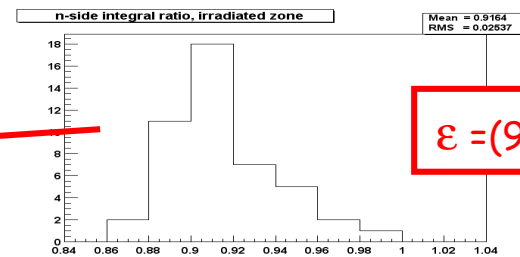
After type-inversion detector functionality still look OK



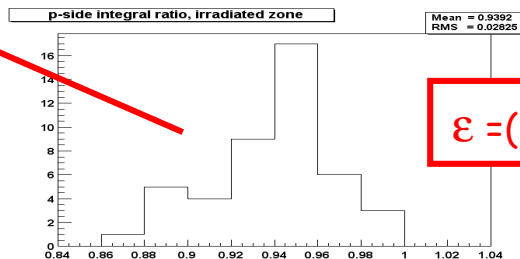
● Drop in Charge Collection Efficiency



Total dose: 9 Mrads
G.Rizzo



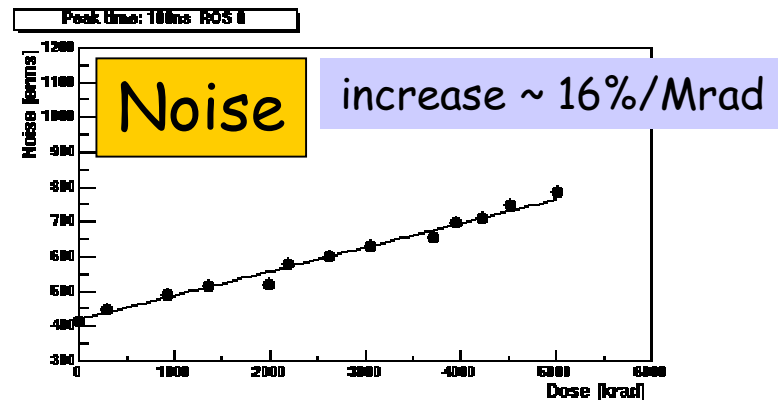
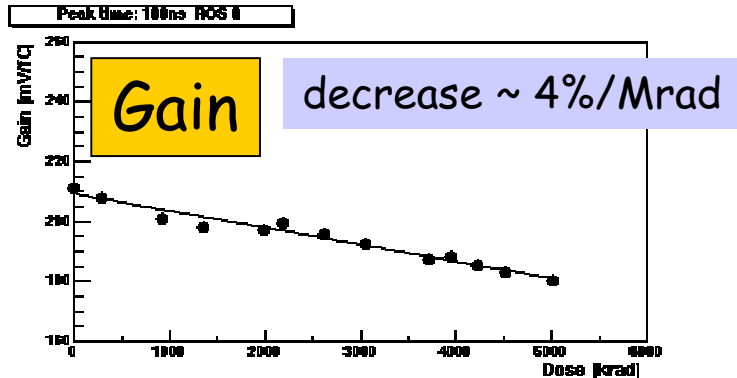
$$\epsilon = (92 \pm 3)\%$$



$$\epsilon = (94 \pm 3)\%$$

Normalized Efficiency

Expected damage to the electronics:



Radiation tests performed on Atom chips in 2001 using Co^{60} sources at SLAC and LBL and more recently with electrons at Elettra (Trieste)

Decrease in gain (4% / Mrad)

Increase in noise (16% / Mrad)

Shift in channel pedestal

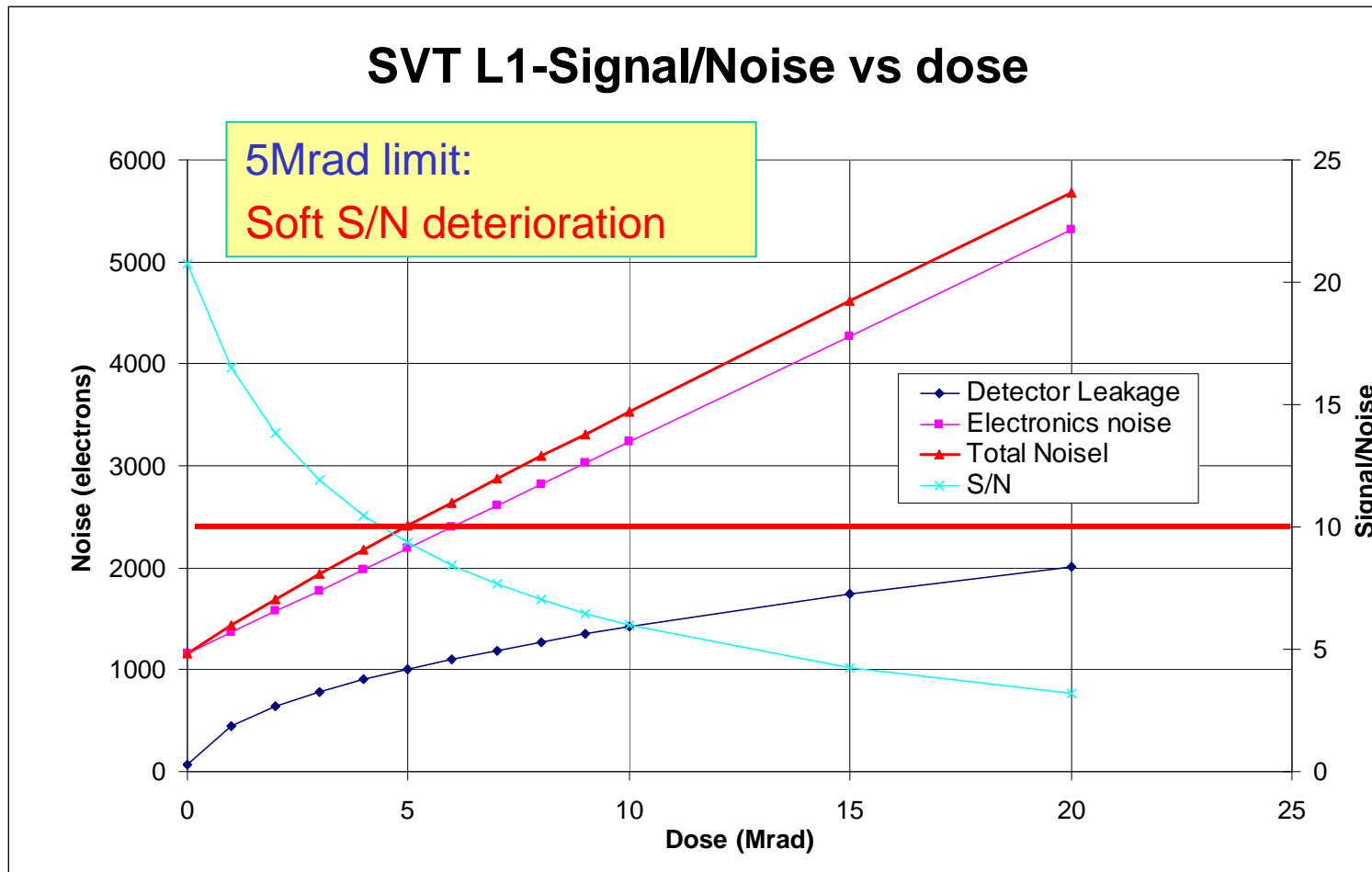
No digital failure observed up to 5 MRads

In the real system the gain decreases by $\sim 5\%/Mrad$, noise increases by $15\text{-}20\%/Mrad$

-> Exactly the same numbers we found with the ^{60}Co

Mixing the ingredients

performance degradation with radiation



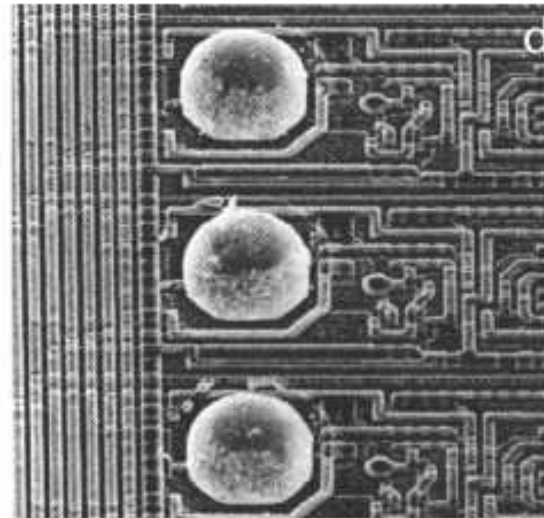
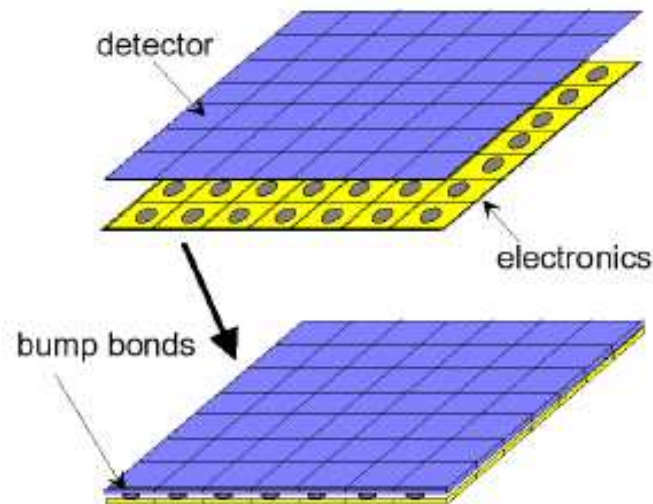
S/N = 10 at 5 Mrads, S/N = 6 at 10 Mrads

Altri rivelatori al Silicio

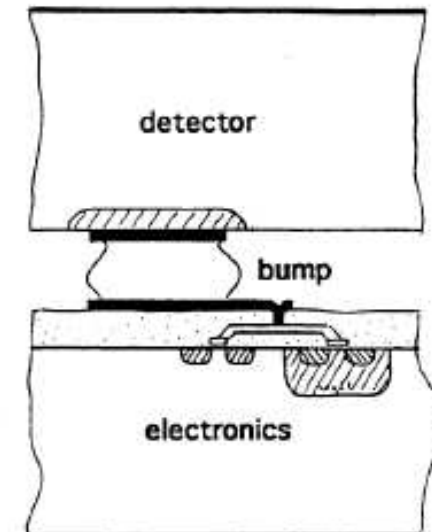
- Rivelatori a pixel ibridi
- CCD
- Silicon Drift Chamber
- Rivelatori 3D
- Rivelatori a pixel monolitici CMOS

Silicon Pixel Detectors

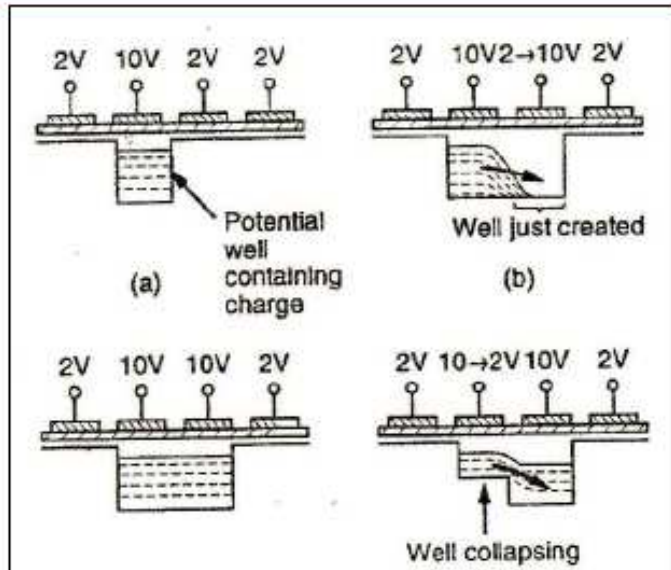
- segmentation in both coordinates → **matrix**
- readout electronics with similar geometry
- connection by "Bump Bonding"
- use soft material like Indium or Gold
- complex readout architecture
- **true 2D hits** ⇒
- extensive use in LHC experiments



Flip-Chip Technique



Charged Coupled Devices (CCD)

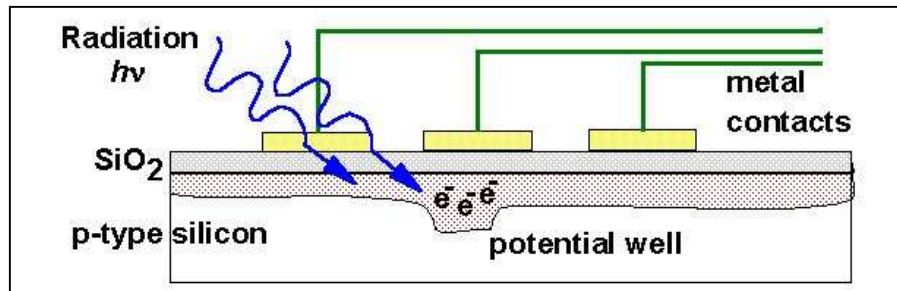


- **Advantage:**

- many detector channels can be readout with few readout channels

- **Disadvantage:**

- small signal charge ($\approx 2000e$) \rightarrow need cooling
- long readout time (several 1000 transfers)
- detector active during readout



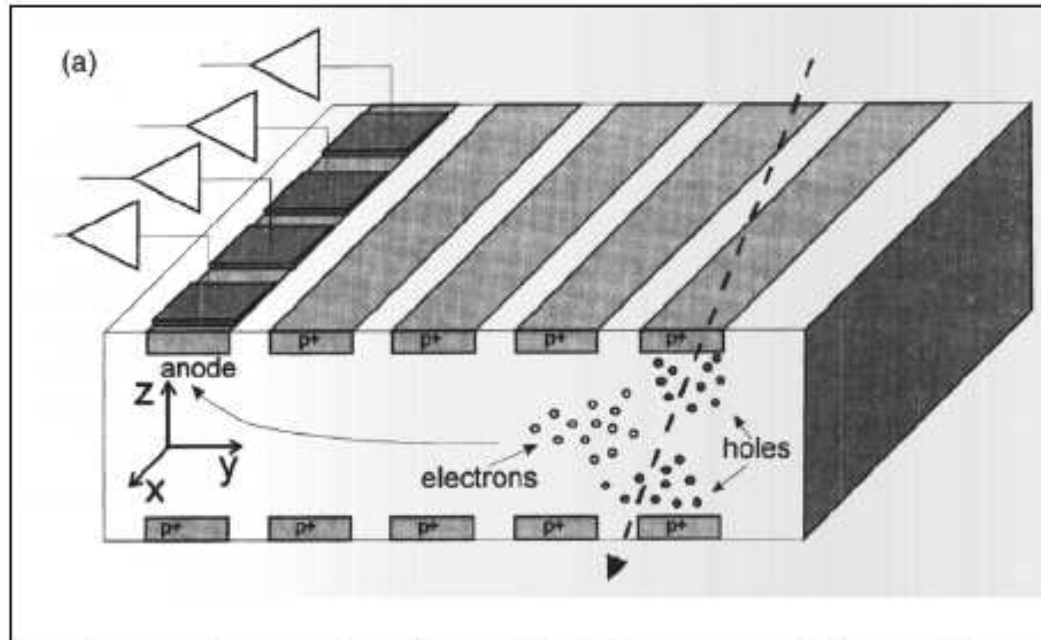
\Rightarrow only applicable for low rate environment like at e^+e^- experiments

- e.g. successfully used at SLD

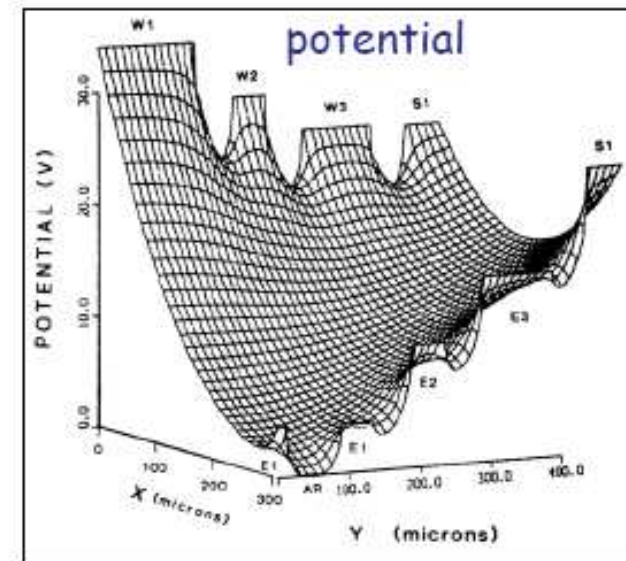
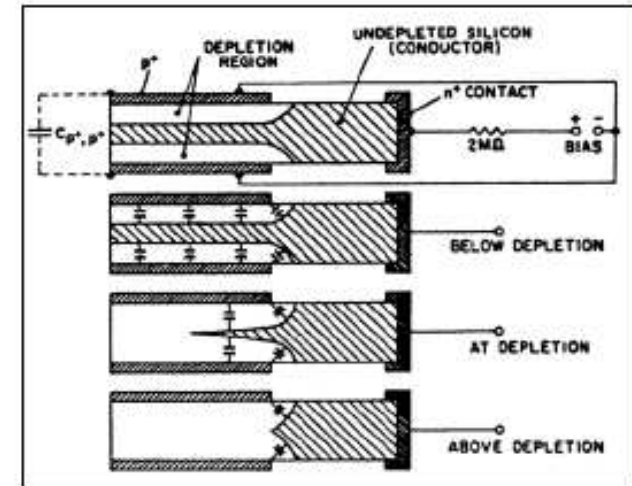
- 1996 VXD3:

307×10^6 pixel a $22 \times 22 \mu m^2$

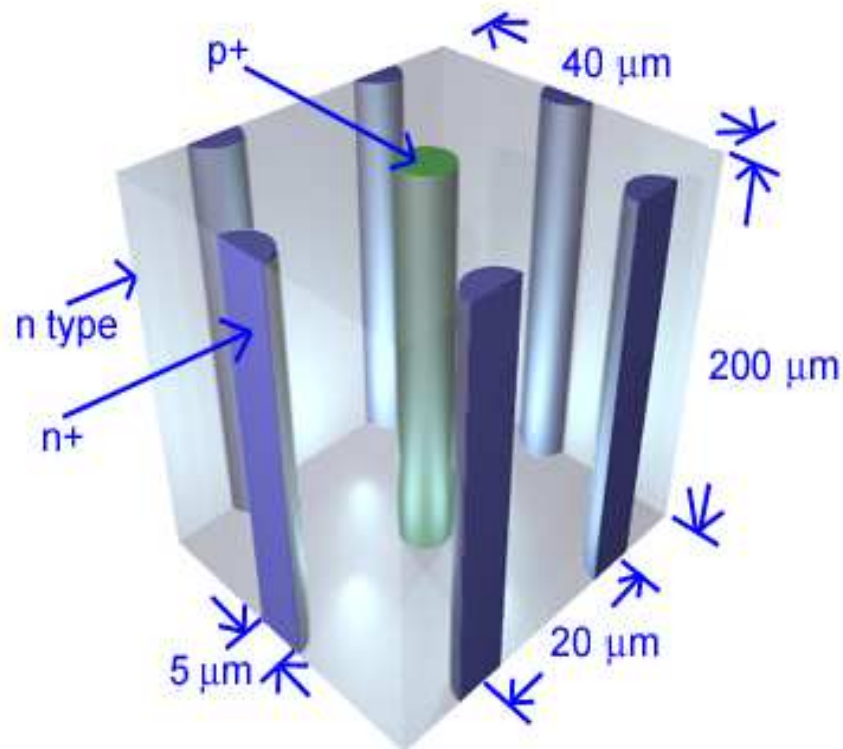
Silicon Driftchambers



- readout-electrode decoupled from sensitive volume
- relatively small capacitance (low noise)
- resolution $\approx 10\mu\text{m}$ for 5-10cm drift distance
- dE/dx measurement (STAR heavy-ion)
- drift velocity must be known very well
- not radiation hard

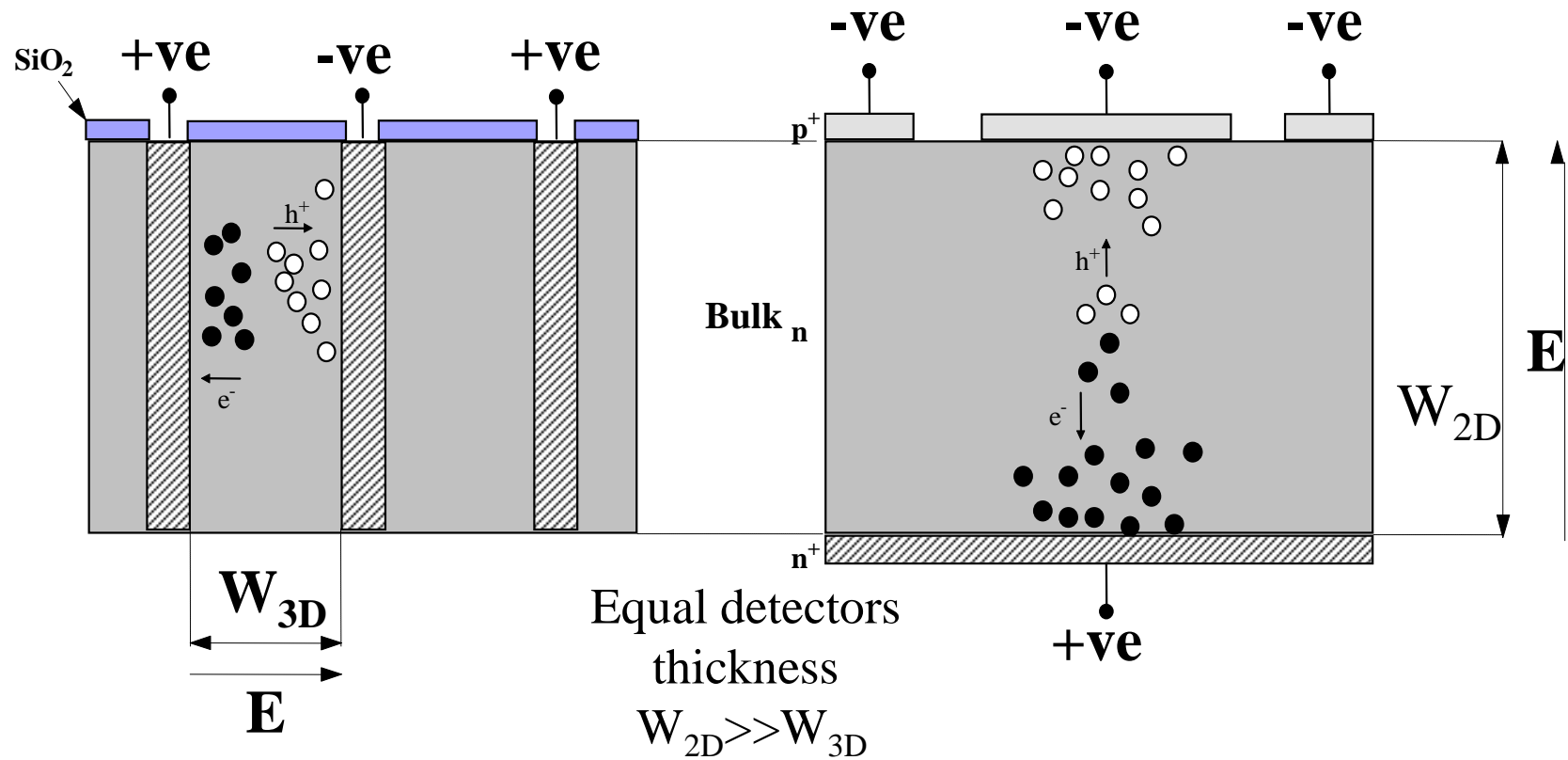


The 3-D device



- Co-axial detector
 - Arrayed together
- Micron scale
 - USE Latest MEM techniques
- Pixel device
 - Readout each p+ column
- Strip device
 - Connect columns together

Operation of 3D



Carriers swept horizontally
Traverses short distance between electrodes

Carriers drift total
thickness of material

Advantages of 3D

- If electrodes are close
 - Low full depletion bias
 - Low collection distances
 - Thickness NOT related to collection distance
 - No charge spreading
 - Fast charge sweep out

CMOS MAPS

Use epitaxial layer of CMOS low-resistivity substrate to collect charge (thermal diffusion)

Potential for low cost and very small thickness (reduced substrate).

Radiation hard if using sub-micron CMOS process

Low power-consumption (circuitry active only during read-out)

Until now: miniscule pixel size (a few μm) prevents usage in large system

