

# I rivelatori a silicio

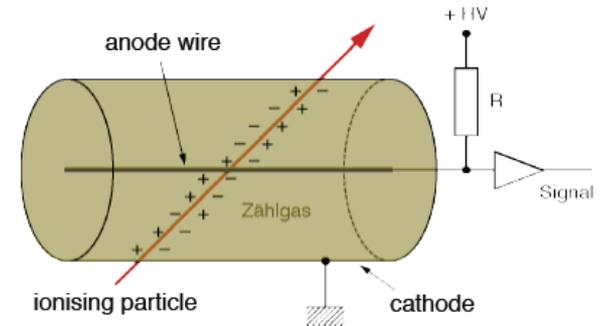
Serena Mattiazzo

(serena.mattiazzo@pd.infn.it)

# Cos'è un rivelatore a silicio?

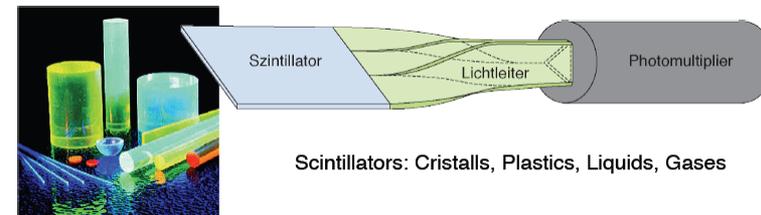
## ❑ NON è un rivelatore a gas!

Particelle cariche ionizzano il gas. Gli elettroni e gli ioni positivi si spostano verso gli elettrodi. Un campo elettrico elevato vicino al filo causa una ionizzazione secondaria e una moltiplicazione del segnale



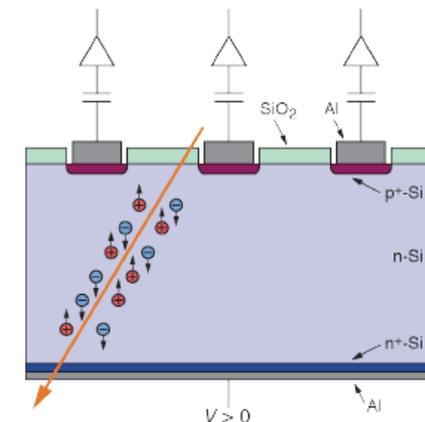
## ❑ NON è uno scintillatore!

Particelle cariche, penetrando, eccitano livelli atomi o molecolari. Quando tali stati eccitati decadono, vengono emessi fotoni



## ❑ E' un rivelatore a semiconduttore!

Una particella carica che attraversa il dispositivo genera coppie elettrone-lacune. Queste cariche vengono raccolte dagli elettrodi, dando origine ad un segnale



# Cosa si vuole misurare- cosa si può misurare

## In genere siamo interessati a misurare una o più delle seguenti grandezze:

1. L'**energia** della particella (o il suo  $dE/dx$ )
2. Il **momento** della particella ( $\rightarrow$  la sua posizione in presenza di un campo magnetico)
3. Il **tempo** del passaggio della particella ( $\rightarrow$  posizione con la misura del TOF)
4. Il **numero** delle particelle (o il numero di particelle per unità di area)

## Quello che misuriamo è:

1. **Carica** [assumendo che  $q \propto E$ ]
2. **Carica** [ $q(x,y)$  determina la posizione]
3. **Carica**  $\rightarrow V \rightarrow V(t)$
4. **Carica** [assumendo che  $q(x,y) \propto N(x,y)$ ]

# Rivelatori a Silicio: vantaggi e svantaggi

- ❑ I rivelatori a semiconduttore hanno un'elevata densità:
  - grande perdita di energia su distanze piccole
  - la diffusione è minore rispetto ad un rivelatore a gas, che si traduce in migliori prestazioni in termini di risoluzione spaziale ( $< 10\mu\text{m}$ )

- ❑ Energia di ionizzazione bassa

- (pochi eV per generare una coppia e-h) rispetto ai rivelatori a gas (20-40 eV per una coppia e-ione) o agli scintillatori (400-1000eV per la creazione di un fotoelettrone)



- ❑ Grande esperienza a livello industriale nello sviluppo di microchip (silicio)

- sviluppo rapido dei rivelatori, costi ridotti

- ❑ Facile integrazione con l'elettronica di lettura (stesso materiale)

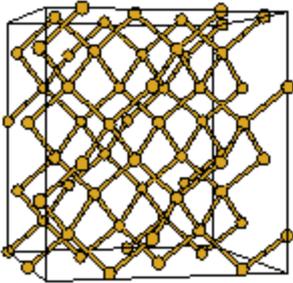
- ❑ Resistenza alle radiazioni



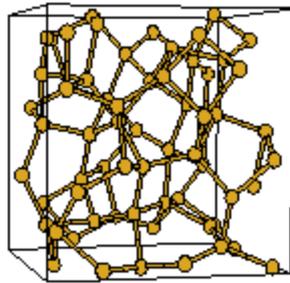
- ❑ No guadagno interno (con eccezione di APD, SiPM)

# Semiconduttori: struttura cristallina

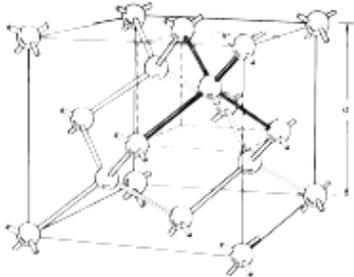
Silicio cristallino



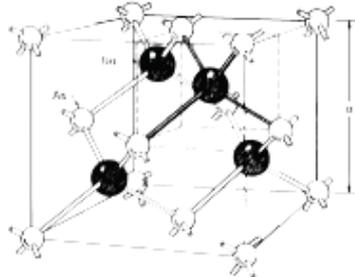
Silicio amorfo



Diamond lattice



Zincblende lattice



Silicio, germanio e diamante sono elementi del IV gruppo. La struttura cristallina è il reticolo del diamante (cristallo covalente tetraedrico); la sua struttura cristallina è **cubica a facce centrate (FCC)**. Ogni atomo è circondato da 4 atomi equidistanti

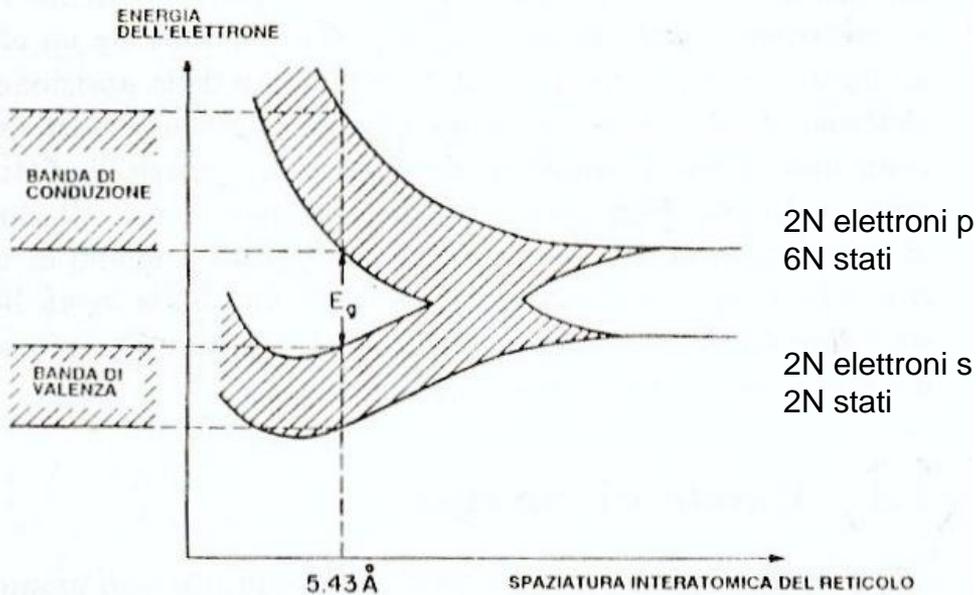
	III	IV	V	A
5	B	C	N	P
	BORO	CARBONIO	AZOTO	FOSFORO
13	Al	Si	S	S
	ALLUMINIO	SILICIO	ZINCO	ZINCO
31	Ga	Ge	As	S
	GALLIO	GERMANIO	ARSENICO	ARSENICO
49	In	Sn	Pb	S
	INDIO	STAGNO	PIOMBO	PIOMBO
81	Tl	Pb	Bi	S
	TALLIO	PIOMBO	BISFUTO	BISFUTO

Nel caso in cui i due FCC siano di elementi diversi il reticolo è detto **zincoblenda** (è il caso ad esempio dell'arseniuro di gallio GaAs)

- ❑ **Germanio**: usato in fisica nucleare; band gap piccola (0.66eV): richiede di operare a basse temperature (azoto liquido a 77K)
- ❑ **Silicio**: materiale standard per la costruzione di rivelatori di vertice e tracciatori nella fisica delle alte energie; può funzionare a bassa temperatura; sinergia con industrie
- ❑ **Diamante**: band gap elevata, non richiede svuotamento, molto resistente alle radiazioni MA segnale piccolo e alti costi

# Struttura a bande e distribuzione di Fermi

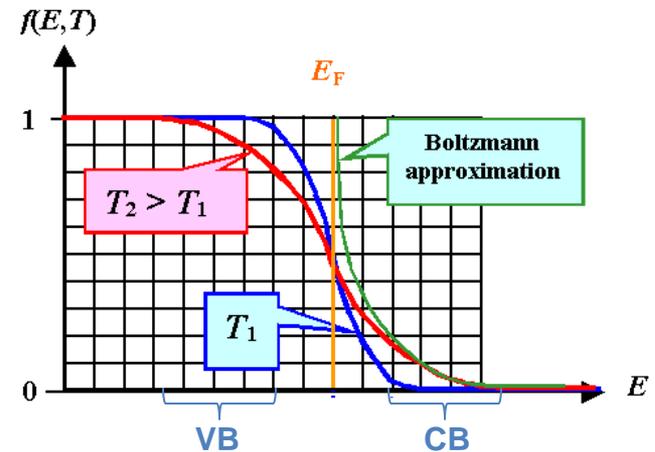
Elemento	N atomico Z	Configurazione
C	6	1s[2] 2s[2] 2p[2]
Si	14	1s[2] 2s[2] 2p[6] 3s[2] 3p[2]
Ge	32	1s[2] 2s[2] 2p[6] 3s[2] 3p[6] 3d[10] 4s[2] 4p[2]
Sn	50	1s[2] 2s[2] 2p[6] 3s[2] 3p[6] 3d[10] 4s[2] 4p[6] 4d[10] 5s[2] 5p[2]



$D_C$ : 3.56 Å  
 $D_{Si}$ : 5.42 Å  
 $D_{Ge}$ : 5.62 Å  
 $D_{Sn}$ : 6.46 Å

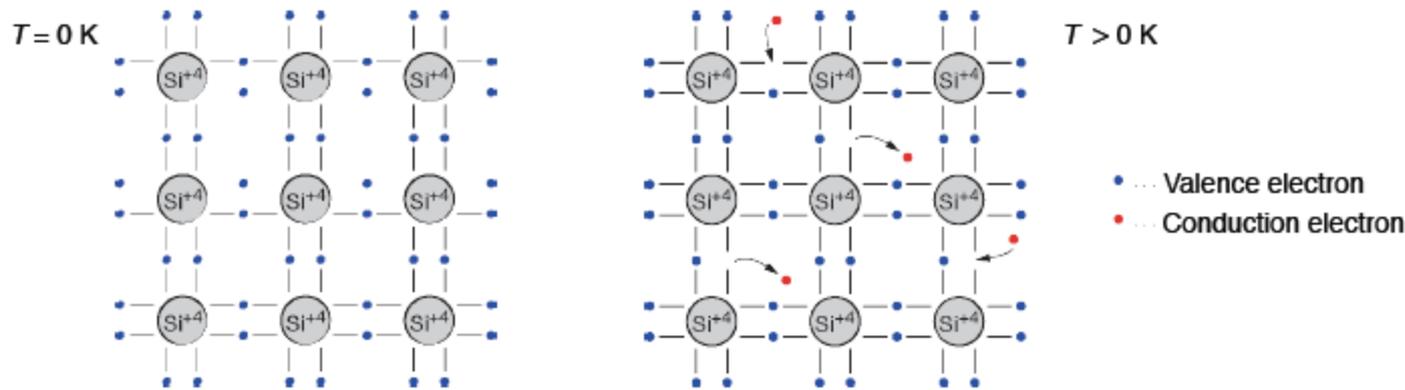
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

Distribuzione di Fermi



# Semiconduttori: modello

Esempio: **semiconduttore del IV gruppo (Silicio)**; proiezione in 2 D



- ✓ Ogni atomo ha 4 vicini; i 4 elettroni dell'orbitale più esterno sono condivisi e formano dei legami covalenti
- ✓ A temperatura bassa tutti gli elettroni sono legati agli atomi
- ✓ A temperature più alte, le vibrazioni termiche possono spezzare alcuni dei legami: gli elettroni così liberati possono causare conduttività
- ✓ I legami che restano scoperti attraggono altri elettroni → le lacune si spostano (conduzione)

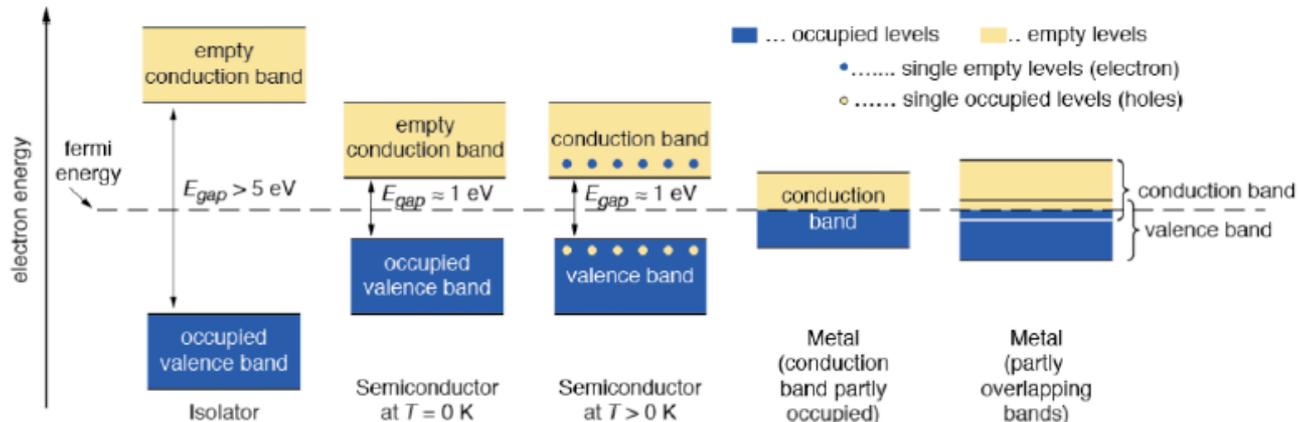
**Probabilità di creazione termica di una coppia e-h:**

$$P(T) = C \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$k_B T = 0.025 \text{ eV @ } T = 300 \text{ K}$$

# Struttura a bande e portatori di carica

- ✓ In un **atomo isolato** gli elettroni possono assumere solo **livelli discreti di energia**.
- ✓ In un **materiale cristallino** I livelli atomici si uniscono a formare delle **bande di energia**.
- ✓ Nei **metalli** la banda di valenza e quella di conduzione si sovrappongono, mentre negli **isolanti** e nei **semiconduttori** questi due bande sono separate da una banda proibita (band gap). Negli isolanti la band gap è larga.



- ❑ A causa della band gap relativamente bassa, nei semiconduttori a temperatura ambiente gli elettroni occupano la banda di conduzione
- ❑ Gli elettroni nella banda di conduzione possono ricombinarsi con le lacune
- ❑ Si raggiunge un equilibrio termico fra l'eccitazione e la ricombinazione
- ❑ La concentrazione di portatori di carica è:  $n_e = n_h = n_i$

**$n_i$ : concentrazione intrinseca di portatori**

$$n_i \approx T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

- ✓ Nel silicio puro  $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$ .
- ✓ Con una densità di  $10^{22} \text{atomi/cm}^3$ , circa 1 atomo di Si su  $10^{12}$  è ionizzato

# Silicio: velocità/mobilità portatori, resistività

▣ Velocità di drift:

**Elettroni**

$$\vec{v}_n = -\mu_n \cdot \vec{E}$$

**Lacune**

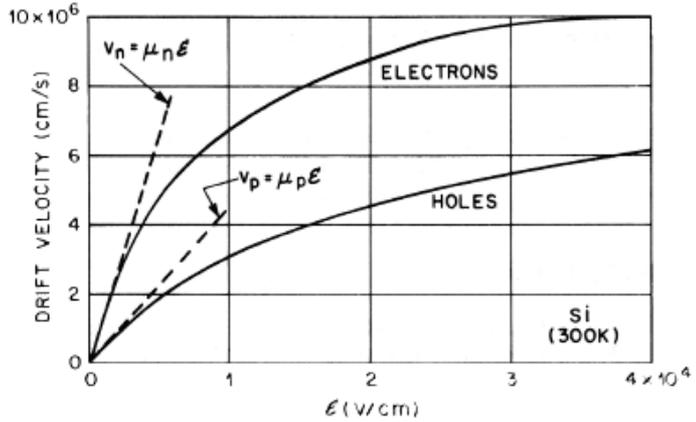
$$\vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E}$$

▣ Mobilità:

$$\mu_n = \frac{e \cdot \tau_n}{m_n}$$

$$\mu_p = \frac{e \cdot \tau_p}{m_p}$$

e: carica dell'elettrone  
 $\tau_{n,p}$ : tempo libero medio fra collisioni;  
 $m_{n,p}$ : massa efficace (e,h);  
 E: campo elettrico esterno.



Nel Si le mobilità sono costanti in buona approssimazione per  $E < 1$  kV/cm

A  $T = 300K$  si ha:  $\mu_n \approx 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$   
 $\mu_p \approx 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Velocità di deriva  $10^6 - 10^7$  cm/s; in campi  $10^3 - 10^4$  V/cm tende a saturare a  $10^7$  cm/s

▣ Resistività di un semiconduttore:

$$\rho = \frac{1}{e(\mu_n n_e + \mu_p n_h)}$$

$n_e, n_h$ : densità portatori di carica  
 $\mu_n, \mu_p$ : Mobilità  
 $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

$\rho \approx 230 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  Resistività intrinseca del Silicio

# Confronto fra diversi semiconduttori

Material	Si	Ge	GaAs	GaP	CdTe	Diamond*
Atomic number $Z$	14	32	31+33	31+15	48+52	6
Atomgewicht $A$ (amu)	28.086	72.61	69.72+74.92	69.72+30.97	112.4+127.6	12.011
Lattice constant $a$ (Å)	5.431	5.646	5.653	5.451	6.482	3.567
Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.328	5.326	5.32	4.13	5.86	3.52
$E_g$ (eV) bei 300 K	1.11	0.66	1.42	2.26	1.44	5.47–5.6
$E_g$ (eV) bei 0 K	1.17	0.74	1.52	2.34	1.56	≈ 6
rel. permittivity $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$	11.9	16.0	12.8	11.1	10.9	5.7
Melting point (°C)	1415	938	1237	1477	1040	3527
eff. e <sup>-</sup> -mass ( $m_n/m_e$ )	0.98, 0.19	1.64, 0.08	0.067	0.82	0.11	0.2
eff. hole mass <sup>+</sup> ( $m_h/m_e$ )	0.16	0.044	0.082	0.14	0.35	0.25
eff. density of states in conduction band $n_{CB}$ (cm <sup>-3</sup> )	$3 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{19}$	$4.7 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{19}$		≈ $10^{20}$
eff. Density of states in valence band $n_{VB}$ (cm <sup>-3</sup> )	$1 \cdot 10^{19}$	$6 \cdot 10^{18}$	$7 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{19}$		≈ $10^{19}$
Electron mobility $\mu_e$ bei 300 K (cm <sup>2</sup> /Vs)	~1450	3900	8500	< 300	1050	1800
Hole mobility $\mu_h$ bei 300 K (cm <sup>2</sup> /Vs)	~450	1900	400	< 150	100	1200
intrinsic charge carrier density at 300 K (cm <sup>-3</sup> )	$1.45 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^6$	2		≈ $10^{-27}$
intrinsic resistivity at 300 K (Ω cm)	$2.3 \cdot 10^5$	47	≈ $10^8$		≈ $10^9$	≈ $10^{42}$
Breakdown field (V/cm)	$3 \cdot 10^5$	≈ $10^5$	$4 \cdot 10^5$	≈ $10^6$		$3 \cdot 10^7$
Mean $E$ to create an e <sup>-</sup> -h <sup>+</sup> pair (eV), 300 K	3.62	2.9	4.2	≈ 7	4.43	13.25

Source: <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>; S.M.Sze, *Physics of Semicon. Devices*, J. Wiley & Sons, 1981, J. Singh, *Electronic & Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*, Cambridge University Press, 2003

# Il rivelatore a semiconduttore ideale

Uno dei parametri più importanti di un rivelatore è il rapporto segnale/rumore (SNR).  
Un buon rivelatore dovrebbe avere un SNR alto; questo porta a due requisiti in contraddizione:

- ✘ **Segnale grande**

  - Energia di ionizzazione bassa → band gap piccola

- ✘ **Rumore basso**

  - Pochi portatori intrinseci → band gap grande

Il materiale ideale dovrebbe avere una band gap  $E_g \approx 6 \text{ eV}$

In questo caso, a temperatura ambiente la banda di conduzione è quasi vuota e la band gap è sufficientemente piccola da creare un gran numero di coppie e/h per ionizzazione.

Tale materiale esiste, ed è il **diamante**. Tuttavia anche i diamanti artificiali sono troppo costosi per rivelatori estesi

# Stima del SNR in un rivelatore a silicio intrinseco

Qual è il **SNR** (signal to noise ratio) in un **rivelatore intrinseco** di silicio?

- Energia media di ionizzazione:  $I_0 = 3.62\text{eV}$
- Perdita media di energia per unità di percorso:  $dE/dx = 3.87\text{MeV/cm}$
- Concentrazione di portatori intrinseci a  $T = 300\text{K}$ :  $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- Assumiamo di aver un rivelatore di spessore  $d = 300\mu\text{m}$  e di area  $A = 1 \text{ cm}^2$

Il segnale di una MIP in tale rivelatore è:

**Segnale** → 
$$\frac{dE/dx \cdot d}{I_0} = \frac{3.87 \cdot 10^6 \text{ eV/cm} \cdot 0.03\text{cm}}{3.62\text{eV}} \approx 3.2 \cdot 10^4 \text{ e}^- \text{ h}^+ \text{ pairs}$$

La concentrazione di portatori intrinseci nello stesso volume ( $T = 300\text{K}$ ):

**Rumore** → 
$$n_i \cdot d \cdot A = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \cdot 0.03\text{cm} \cdot 1\text{cm}^2 \approx 4.35 \cdot 10^8 \text{ e}^- \text{ h}^+ \text{ pairs}$$

**Il numero di coppie e/h generate termicamente è quattro ordini di grandezza superiore al segnale!!!!**

Dobbiamo rimuovere i portatori di carica → si deve realizzare una giunzione p-n con una zona svuotata

# Giunzione p-n e drogaggio

Una giunzione p-n consiste in un substrato di Silicio drogato n e in uno drogato p:

- Il drogaggio (**doping**) è la sostituzione di un piccolo numero di atomi nel reticolo con atomi dei gruppi vicini nella tavola periodica (con un elettrone di valenza in più (**n-doping**) o con uno in meno (**p-doping**) rispetto al materiale di partenza)
- Livelli tipici di concentrazioni di atomi dopanti per rivelatori a Silicio sono  $\approx 10^{12}$  atomi/cm<sup>3</sup> (10<sup>14</sup> e 10<sup>18</sup> atomi/cm<sup>3</sup> per l'elettronica CMOS)
- Questi atomi droganti inseriscono dei livelli energetici all'interno della band gap e alterano quindi la conduttività del Silicio
- Un semiconduttore **NON DROGATO** è detto **semiconduttore intrinseco**  
Un semiconduttore **DROGATO** è detto **semiconduttore estrinseco**
- In un conduttore intrinseco per ogni elettrone c'è una lacuna. In un semiconduttore estrinseco c'è un surplus di elettroni (n-doping) o di lacune (p-doping).
- Statisticamente un semiconduttore drogato tipo n o tipo p segue la **legge di azione di massa**, cioè in un semiconduttore estrinseco:

$$n \cdot p = n_i^2 = 2.10 \cdot 10^{20}$$

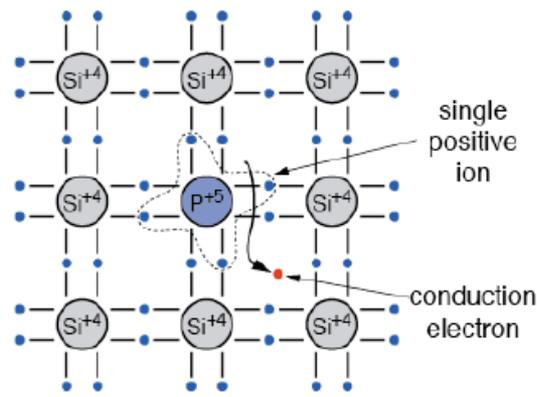
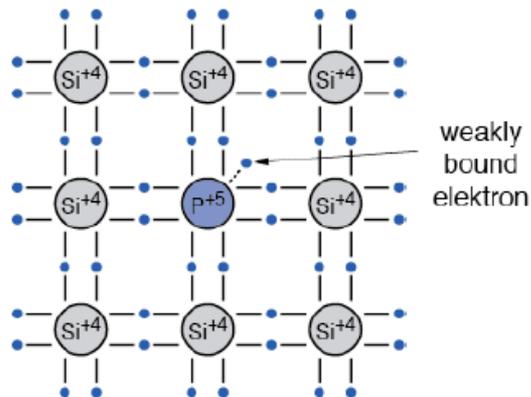
(il prodotto delle concentrazioni rimane costante)

# n-doping in Silicio

IIIA		IVA	VA	
5 B BORO	6 C CARBONIO	7 N AZOTO	8 O OSSIGENO	9 F FLUORO
13 Al ALLUMINIO	14 Si SILICIO	15 P FOSFORO	16 S Zolfo	17 Cl CLORO
31 Ga GALLIO	32 Ge GERMANIO	33 As ARSENICO	34 Se Selenio	35 Br Bromo
49 In INDIO	50 Sn STAGNO	51 Sb ANTIMONIO	52 Te Tellurio	53 I Iodio
81 Tl TALLIO	82 Pb PIOMBO	83 Bi BISMUTO	84 Po Polonio	85 At Astatina

➤ Aggiungendo atomi pentavalenti (cioè che hanno cinque elettroni di valenza: **P, As, Sb**), si ha un **drogaggio di tipo n**. Questi atomi avranno 4 legami covalenti, mentre il quinto elettrone è solo debolmente legato (no legame covalente) e può essere facilmente promosso alla banda di conduzione.

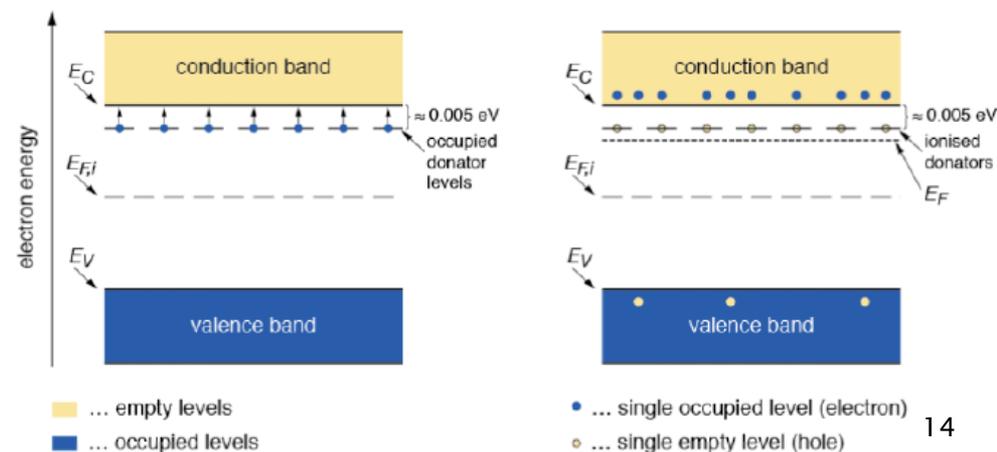
➤ L'atomo drogante è detto **donore**. La carica spaziale  $N_{eff}$  è **positiva**



Poiché l'eccitazione di questi elettroni non crea lacune in banda di valenza, il numero di elettroni in questi materiali è superiore a quello delle lacune. In questo caso gli **elettroni sono i portatori di carica maggioritari** e le **lacune i portatori di carica minoritari**.

➤ L'aggiunta di atomi donori introduce dei livelli energetici permessi per gli elettroni appena al di sotto della banda di conduzione.

➤ A temperatura ambiente la maggior parte di tali elettroni si trova nella banda di conduzione.

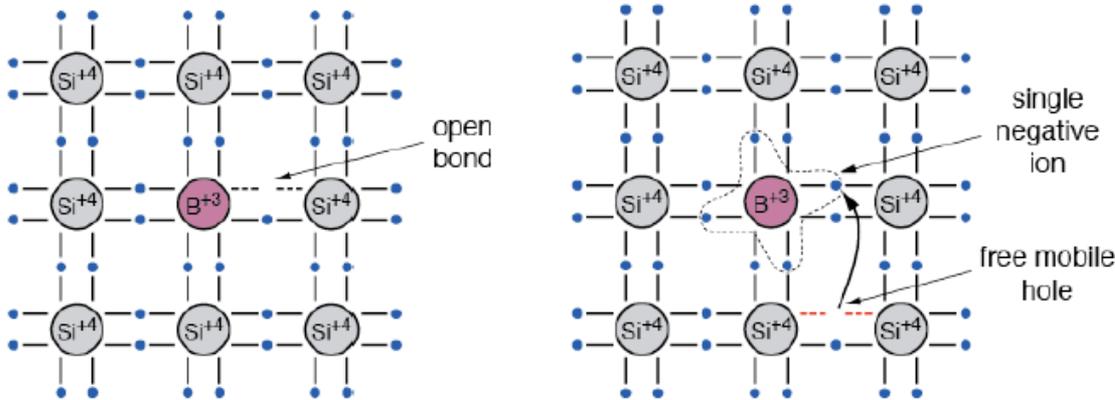


# p-doping in Silicio

IIIA		IVA		VA	
5 B BORO	6 C CARBONIO	7 N AZOTO	8 O OSSIGENO	9 F FLUORO	10 Ne NEON
13 Al ALLUMINIO	14 Si SILICIO	15 P FOSFORO	16 S Zolfo	17 Cl CLORO	18 Ar ARGON
31 Ga GALLIO	32 Ge GERMANIO	33 As ARSENICO	34 Se Selenio	35 Br Bromo	36 Kr Kriptone
49 In INDIO	50 Sn STAGNO	51 Sb ANTIMONIO	52 Te Tellurio	53 I Iodio	54 Xe Xenone
81 Tl TALLIO	82 Pb PIOMBO	83 Bi BISMUTO	84 Po Polonio	85 At Astenio	86 Rn Radone

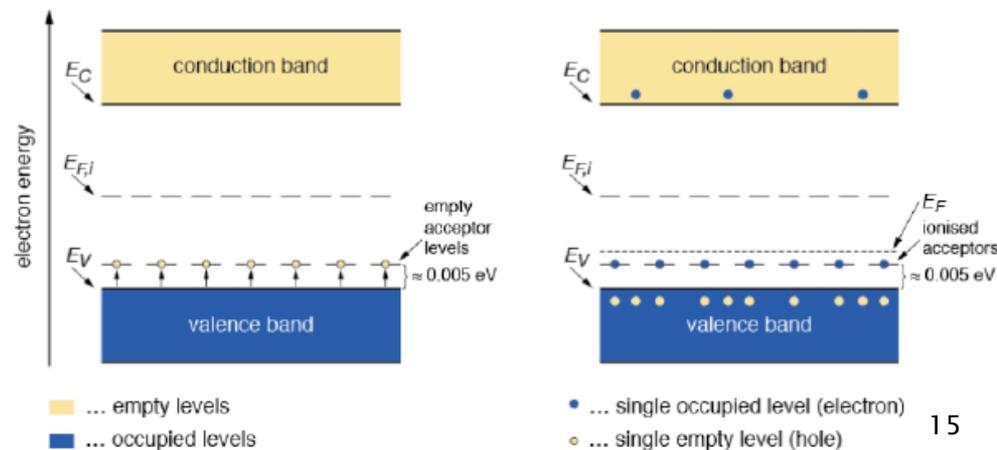
➤ Aggiungendo atomi trivalenti (cioè che hanno tre elettroni di valenza: **B**), si ha un **drogaggio di tipo p**. Un elettrone manca da uno dei possibili quattro legami covalenti. In tal modo l'atomo può accettare un elettrone dalla banda di valenza per completare il quarto legame, questo genera la formazione di una lacuna

➤ L'atomo drogante è detto **accettore**. La carica spaziale  $N_{eff}$  è **negativa**



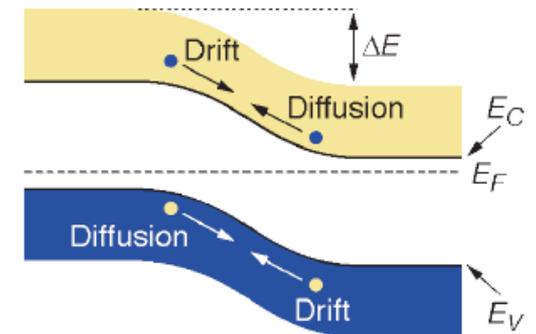
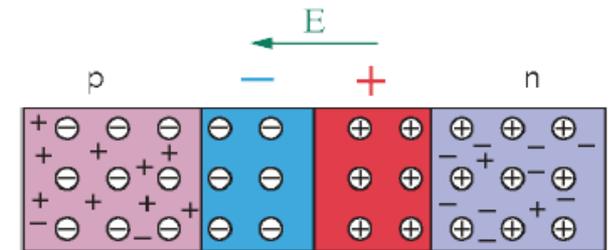
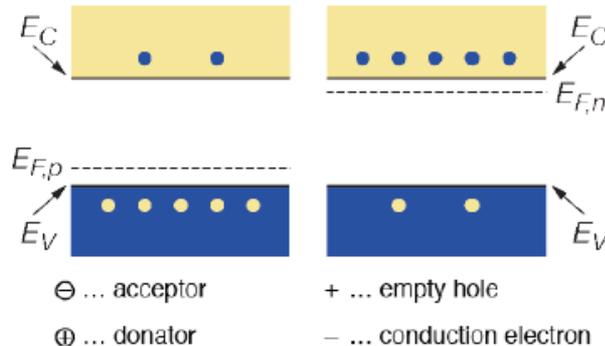
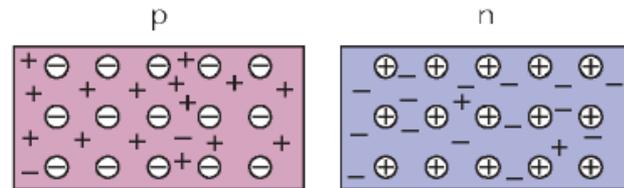
In questo caso le lacune sono i **portatori di carica maggioritari** e gli **elettroni i portatori di carica minoritari**.

➤ L'aggiunta di atomi accettori introduce dei livelli energetici permessi per le lacune appena al di sopra della banda di valenza.



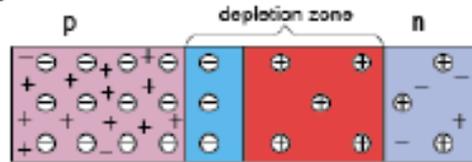
# Come si crea una giunzione p-n

- Quando due semiconduttori diversi (uno di tipo p, uno di tipo n) vengono messi a contatto l'uno all'altro, si realizza una struttura comunemente indicata come "**giunzione p-n**".
- Gli elettroni tendono a muoversi, per **diffusione**, nella zona P, dove sono in numero notevolmente inferiore. La situazione è la stessa per le lacune, che diffonderanno dalla zona P alla zona N
- Il processo di diffusione si arresta presto. Gli elettroni e le lacune lasciano dietro di se gli ioni positivi degli atomi donori e gli ioni negativi degli atomi accettori. Il **campo elettrostatico** dovuto a queste cariche, immobili nel reticolo, si oppone al moto di diffusione deformando le bande di valenza e di conduzione
- Nelle immediate vicinanze della giunzione verrà a crearsi una zona vuota di portatori (**depletion layer**)
- Il numero degli ioni positivi, da una parte, deve essere uguale a quello degli ioni negativi dall'altra, per la **neutralità della carica spaziale**



# Giunzione p-n: caratteristiche elettriche

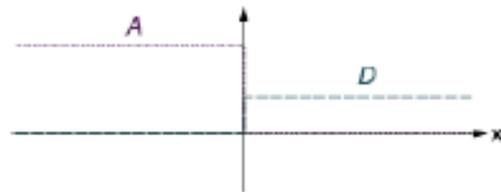
pn junction scheme



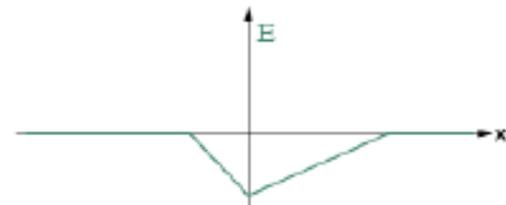
concentration of free charge carriers



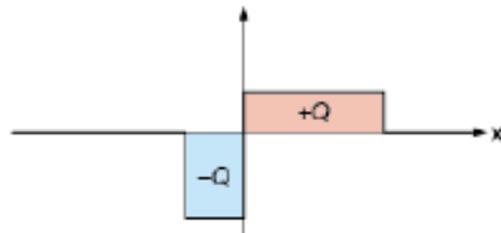
acceptor and donator concentration



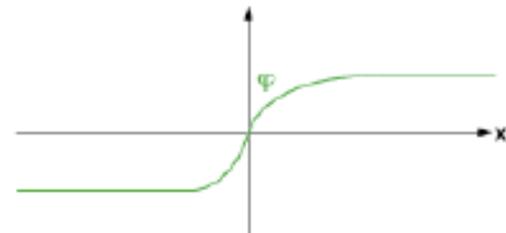
electric field



space charge density

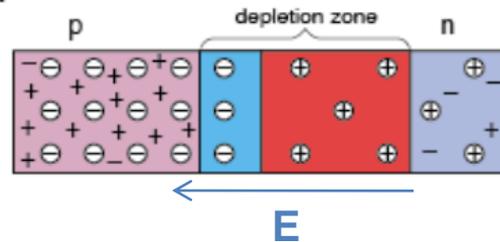


electric potential

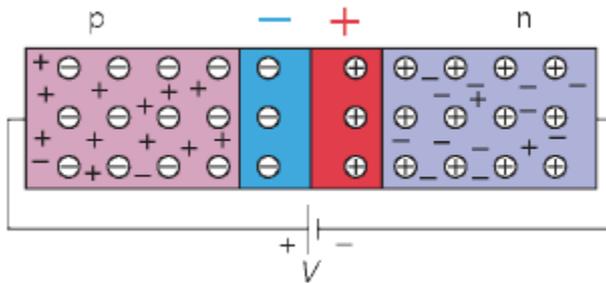


- ⊖ ... acceptor
- ⊕ ... donator
- + ... empty hole
- ... conduction electron

# Polarizzazione diretta e inversa



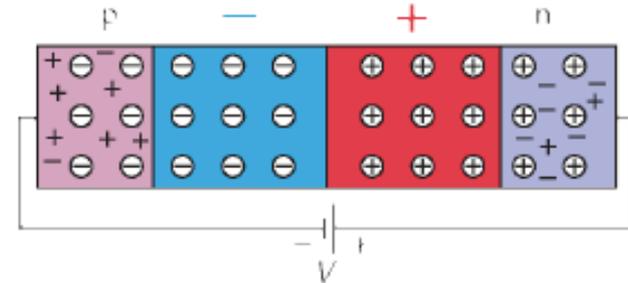
Giunzione p-n con polarizzazione diretta



Applicando un potenziale esterno  $V_p > V_n$  (polarizzazione diretta), elettroni e lacune si spostano verso la zona svuotata:

**La zona svuotata si restringe!**

Giunzione p-n con polarizzazione inversa



Applicando un potenziale esterno  $V_n > V_p$  (polarizzazione inversa), elettroni e lacune si allontanano dalla zona svuotata:

**La zona svuotata si allarga!**

**La corrente attraverso la giunzione è piccola: la depletion layer di una giunzione p-n può essere usata come rivelatore!**

# La regione di svuotamento (1)

Potenziale; Campo elettrico, larghezza depletion,  $E_{\max}$

Equazione di Poisson:

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{d^2 \psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad \text{con} \quad \rho(x) = \begin{cases} -eN_A & -x_p < x < 0 \\ eN_D & 0 < x < x_N \end{cases}$$

Neutralità della carica spaziale:  $N_A x_p = N_D x_N$

Condizioni al contorno:

$$\begin{cases} E(x_p) = E(x_N) = 0 \\ \psi(x_N) - \psi(x_p) = -V + V_0 = V_T \end{cases}$$

Zona p

Zona n

Eq. di Poisson

$$\frac{d^2 \psi_1}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon} N_a$$

$$\frac{d^2 \psi_2}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon} N_d$$

Campo elettrico

$$\frac{d\psi_1}{dx} = \frac{q}{\epsilon} N_a x + C_1$$

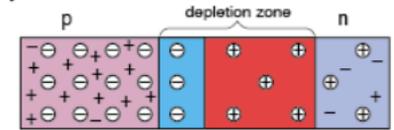
$$\frac{d\psi_2}{dx} = -\frac{q}{\epsilon} N_d x + C_2$$



condiz. di raccordo per  $x = 0$

$$C_1 = C_2$$

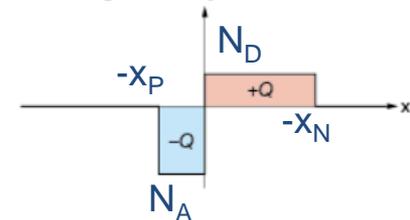
pn junction scheme



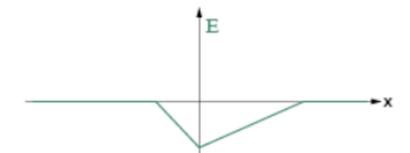
acceptor and donor concentration



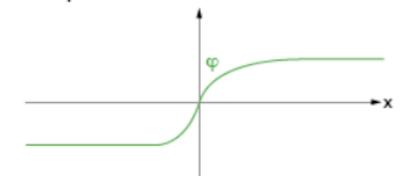
space charge density



electric field



electric potential



# La regione di svuotamento (2)

$$N_A x_P = N_D x_N$$

$$E(x_P) = E(x_N) = 0$$

$$\psi(x_N) - \psi(x_P) = -V + V_0 = V_T$$

Zona p

Zona n

Campo elettrico

$$\frac{d\psi_1}{dx} = \frac{q}{\epsilon} N_a x + C_1$$

$$\frac{d\psi_2}{dx} = -\frac{q}{\epsilon} N_d x + C_1$$

Potenziale

$$\psi_1(x) = \frac{q}{2\epsilon} N_a x^2 + C_1 x + C_3 \quad \psi_2(x) = -\frac{q}{2\epsilon} N_d x^2 + C_1 x + C_4$$

Posso imporre  $\psi_1(0) = \psi_2(0) = 0 \Rightarrow C_3 = C_4 = 0$

Condizioni al contorno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_1}{dx}(-x_P) = 0 \\ \frac{d\psi_2}{dx}(x_N) = 0 \\ \psi_2(x_N) - \psi_1(-x_P) = V_T \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{q}{\epsilon} N_a x_P + C_1 = 0 \\ -\frac{q}{\epsilon} N_d x_N + C_1 = 0 \\ -\frac{q}{2\epsilon} N_d x_N^2 + C_1 x_N - \frac{q}{2\epsilon} N_a x_P^2 + C_1 x_P = V_T \end{array} \right.$$

Campo elettrico

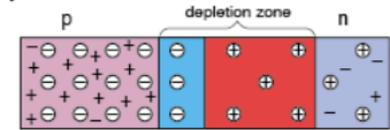
$$E_1(x) = -\frac{d\psi_1(x)}{dx} = -\frac{q}{\epsilon} N_a (x + x_P)$$

$$E_2(x) = -\frac{d\psi_2(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon} N_d (x - x_N)$$

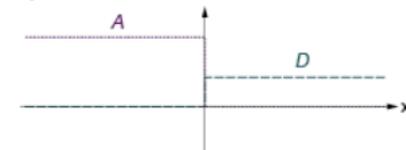
Campo elettrico  
Max (x=0)

$$E_{\max} = E_1(0) = \frac{q}{\epsilon} N_a x_P = \frac{q}{\epsilon} N_d x_N$$

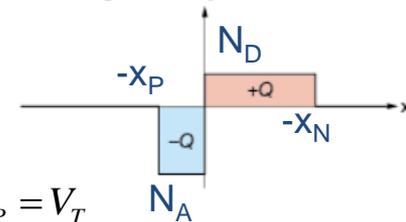
pn junction scheme



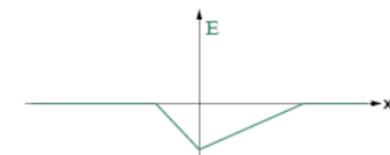
acceptor and donator concentration



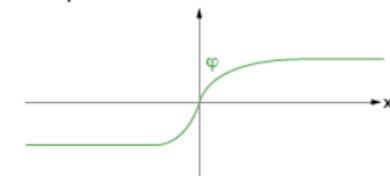
space charge density



electric field



electric potential



# La regione di svuotamento (3)

Da  $\psi_2(x_N) - \psi_1(-x_P) = V_T$  , ossia  $-\frac{q}{2\epsilon} N_d x_N^2 + C_1 x_N - \frac{q}{2\epsilon} N_a x_P^2 + C_1 x_P = V_T$

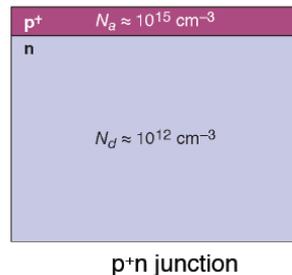
E da  $N_A x_P = N_D x_N$  Posso ricavare  $x_N$  e  $x_P$

$$x_N = \sqrt{\frac{2\epsilon V_T}{q} \frac{N_a}{N_d(N_d + N_a)}} \quad x_P = \sqrt{\frac{2\epsilon V_T}{q} \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}$$

Larghezza della regione di svuotamento:

$$W = x_P + x_N = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) V_T}$$

Tipicamente, un rivelatore a silicio è una **giunzione p-n brusca asimmetrica** (concentrazione droganti molto maggiore in un lato che nell'altro)



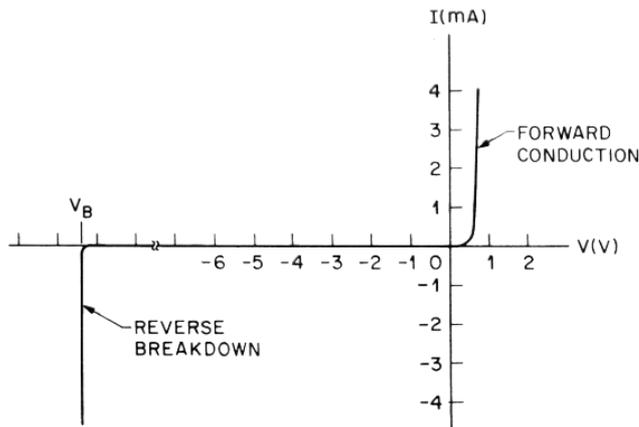
Giunzione brusca asimmetrica

$$N_A \gg N_D \Rightarrow x_P \ll x_N$$

$$W \approx x_N = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V)}{qN_d}} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon|V|}{qN_d}} = \sqrt{2\epsilon\mu\rho|V|}$$

Ricorda che  $\rho = \frac{1}{q(\mu_n n_e)}$

# Corrente di leakage



S.M. Sze, *Semiconductor Devices*, J. Wiley & Sons, 1985

La **caratteristica corrente-tensione** per una giunzione p-n (diodo) è un'esponenziale crescente in polarizzazione diretta, una saturazione a valori molto bassi in polarizzazione inversa. Per un diodo ideale vale:

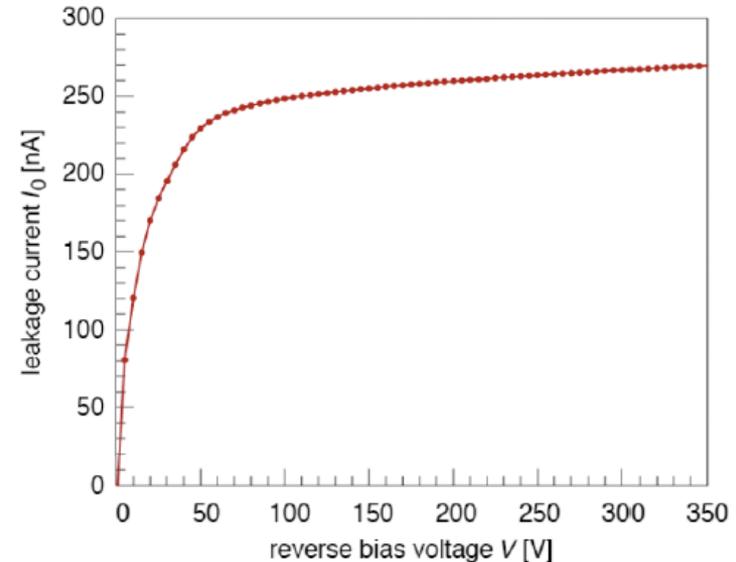
$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Dove  $I_0$  è la corrente inversa di saturazione

➤ Un rivelatore a silicio opera in polarizzazione inversa → la corrente inversa (detta **corrente di leakage**) è un parametro fondamentale.

➤ La corrente di leakage è dominata dalle coppie e/h generate termicamente che, in presenza di un campo elettrico, non si ricombinano ma vengono immediatamente separate. Il moto di elettroni e lacune verso gli elettrodi genera la corrente di leakage.

➤ Dipende dalla qualità del silicio e dal metodo di fabbricazione (buon valore: pochi nA/cm<sup>2</sup>)

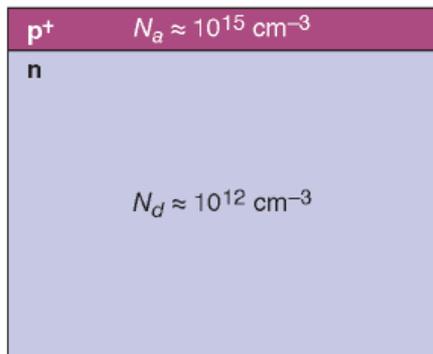


Corrente di leakage misurata sui rivelatori a strip di CMS

# Tensione di svuotamento

La tensione di svuotamento (**depletion voltage**) è la minima tensione alla quale il dispositivo è completamente svuotato. Di solito si lavora ad una tensione leggermente superiore (overdepletion).

Basso drogaggio  $\leftrightarrow$  Alta resistività  $\Rightarrow$  Basse tensioni di svuotamento



p+n junction

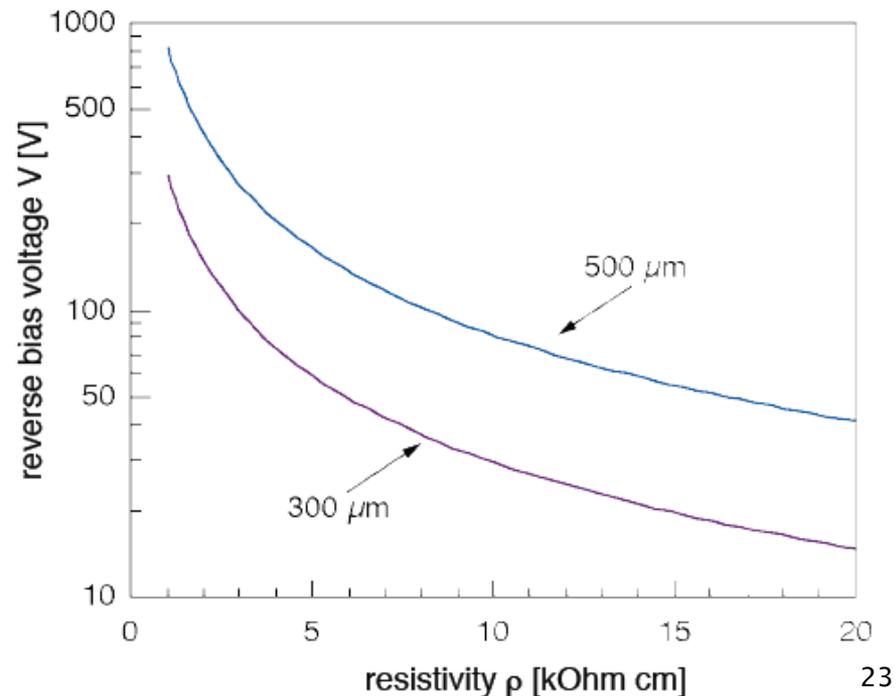
No bias:  $W_P = 0.02 \mu\text{m}$   
 $(V_{bi} \approx 0.4\text{V})$   $W_N = 23 \mu\text{m}$

Con bias:  $W_P = 0.4 \mu\text{m}$   
 $(V = 100\text{V})$   $W_N = 363 \mu\text{m}$

Depletion voltage: 
$$V_{TOT} = \frac{qN_D W^2}{2\varepsilon}$$

Regione p+:  $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \leftrightarrow 13 \Omega \cdot \text{cm}$

Bulk n:  $N_D = 10^{12} \text{ cm}^{-3} \leftrightarrow 4.4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

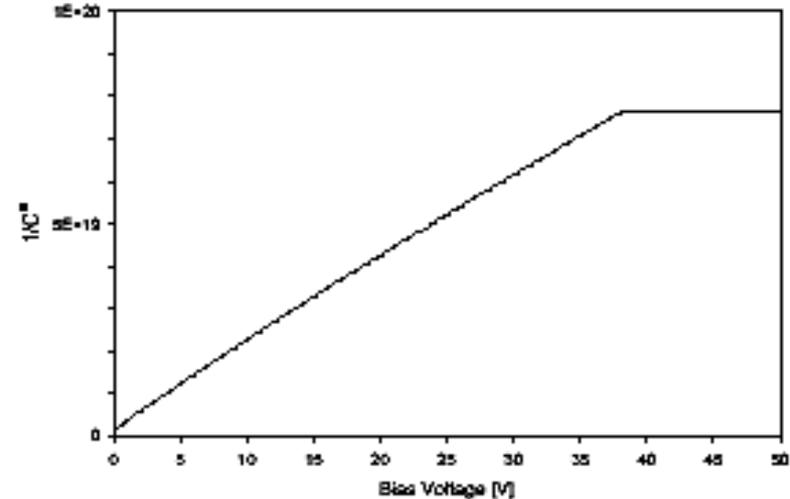
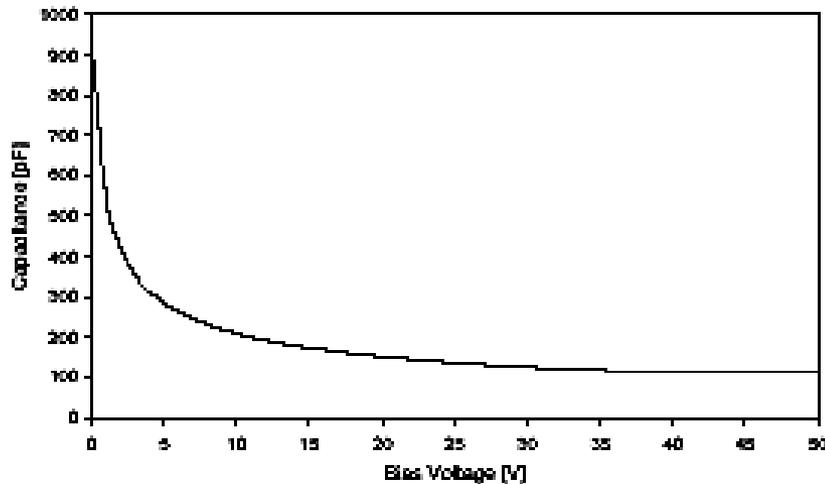


# Capacità di un rivelatore

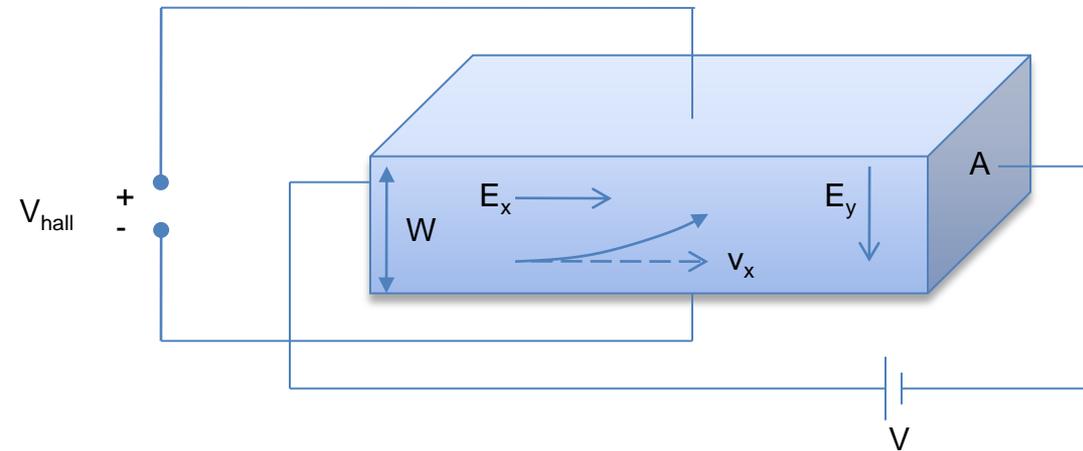
Dal punto di vista elettrico, una giunzione p-n ( $N_A \gg N_D \gg n_i$ ) è equivalente ad un condensatore a facce piane parallele

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{W} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon}{2\mu\rho|V|}} \cdot A \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{C^2} = \frac{2|V|}{q\varepsilon N_D}$$

Normalmente si misura il comportamento dello svuotamento tramite la misura della capacità VS tensione di bias (inverso); un grafico di  $1/C^2$  in funzione di  $V$  produce una retta dalla cui pendenza si ricava la concentrazione del drogaggio (o la resistività)



# Concentrazione e tipo dei portatori



- Campo elettrico  $E_x$
- Campo magnetico  $B_z \rightarrow$  Forza di Lorentz  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = qv_x B_z$
- Forza verso l'alto  $\rightarrow$  accumulo lacune  $\rightarrow E_y$

□ A regime  $qE_y = qv_x B_z \rightarrow E_y = v_x B_z$        $V_{\text{hall}} = E_y W$  : **tensione di Hall**

□ Per le lacune:  $J_p = \frac{I_p}{A} = \sum_{i=0}^p qv_i = qp v_p = qp \mu_p E \Rightarrow v_p = \frac{J_p}{qp}$

□ Il **campo di Hall** è:  $E_y = \left( \frac{J_p}{qp} \right) B_z = R_H J_p B_z$

○ Proporzionale a densità corrente per campo magnetico tramite una costante  
 **$R_H$ : coefficiente di Hall**

$$R_H = \frac{1}{qp}$$

lacune

$$R_H = -\frac{1}{qn}$$

elettroni

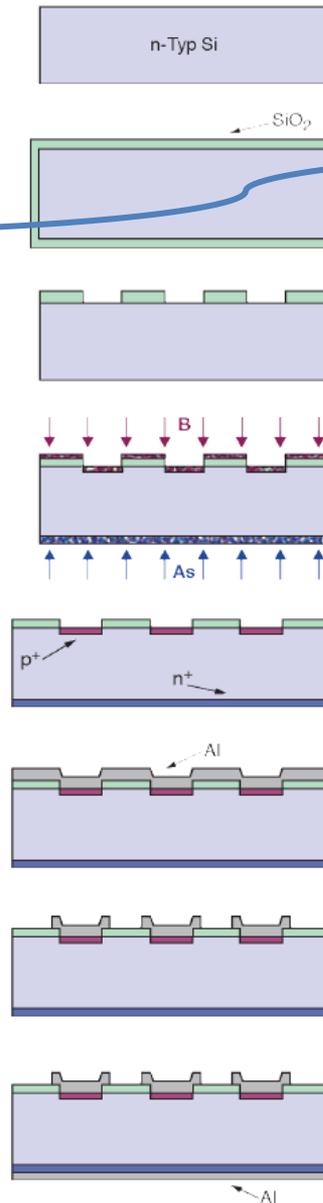
□ Una misura della tensione di Hall per una data corrente nota e per assegnato campo magnetico fornisce:

$$p = \frac{1}{qR_H} = \frac{J_p B_z}{qE_y} = \frac{(I/A)B_z}{q(V_H/W)} = \frac{IB_z W}{qV_H A}$$

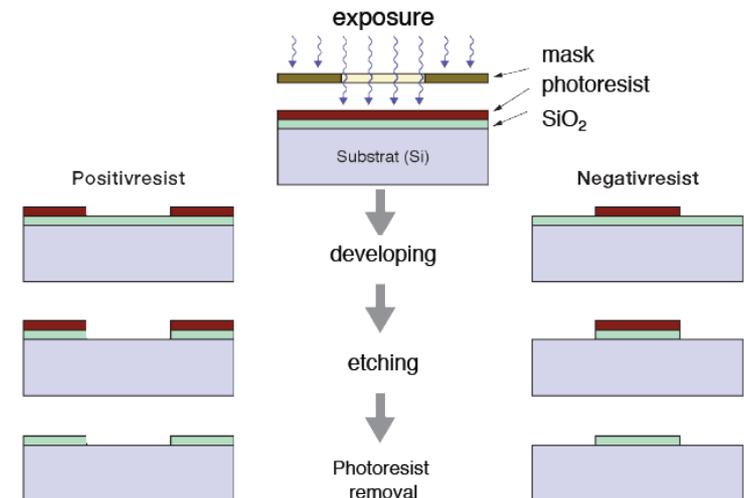
# Come si produce un rivelatore a Silicio

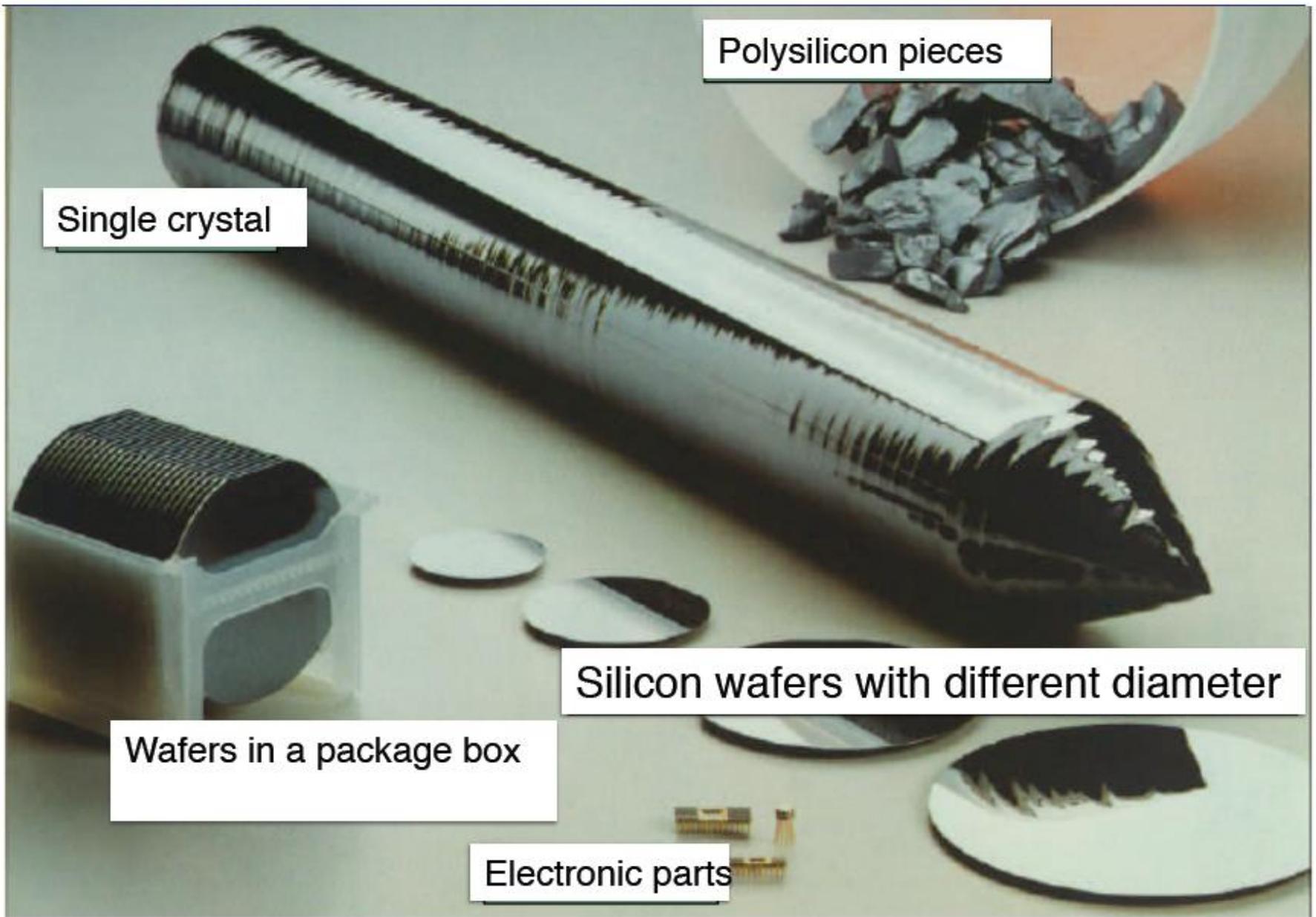
1. Starting Point: single-crystal n-doped wafer ( $N_D \approx 1-5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )
2. Surface passivation by  $\text{SiO}_2$ -layer (approx. 200 nm thick). E.g. growing by (dry) thermal oxidation at 1030 °C.
3. Window opening using **photolithography technique** with etching, e.g. for strips
4. Doping using either
  - Thermal diffusion (furnace)
  - Ion implantation
    - $\text{p}^+$ -strip: Boron, 15 keV,  $N_A \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$
    - Ohmic backplane: Arsenic, 30 keV,  $N_D \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
5. After ion implantation: Curing of damage via thermal annealing at approx. 600°C, (activation of dopant atoms by incorporation into silicon lattice)
6. Metallization of front side: sputtering or CVD
7. Removing of excess metal by photolithography: etching of non-covered areas
8. Full-area metallization of backplane with annealing at approx. 450°C for better adherence between metal and silicon

Last step: wafer dicing (cutting)



## Litografia





Polysilicon pieces

Single crystal

Silicon wafers with different diameter

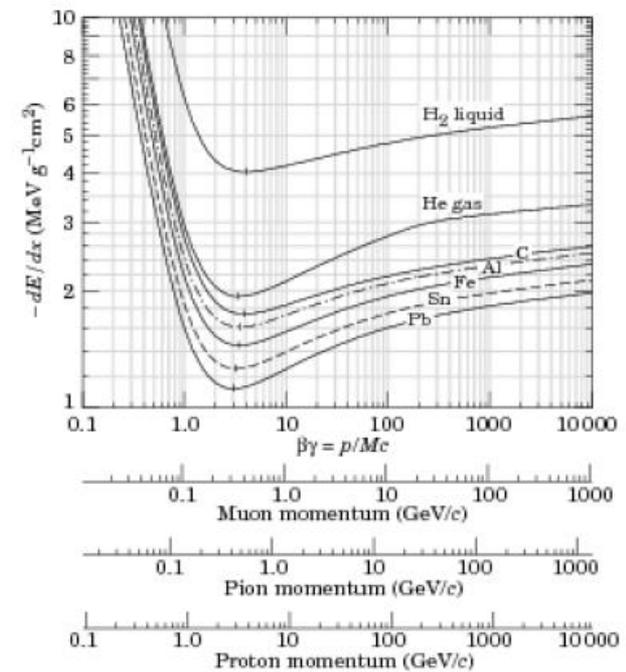
Wafers in a package box

Electronic parts

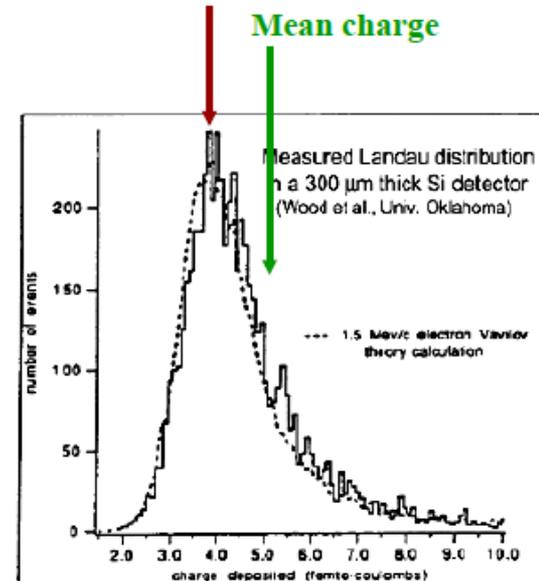
# Carica generata

## Carica rilasciata da una particella al minimo di ionizzazione (MIP)

- **Valore medio di perdita di energia**  
 $dE/dx$  (Si) = 3.88 MeV/cm  
 $\Rightarrow$  116 keV per 300  $\mu\text{m}$  di spessore
- **Valore più probabile di perdita di energia**  
 $\approx 0.7 \times$  media  
 $\Rightarrow$  81 keV per 300  $\mu\text{m}$  di spessore
- **3.6 eV: energia per creare una coppia e/h**  
 $\Rightarrow$  72 e-h/  $\mu\text{m}$  (più probabile)  
 $\Rightarrow$  108 e-h/  $\mu\text{m}$  (medio)
- **Carica rilasciata in 300  $\mu\text{m}$**   
 $\approx 32500 e^- \approx 5.2 \text{ fC}$  (medio)  
 $\approx 22500 e^- \approx 3.5 \text{ fC}$  (più probabile)



**Most probable charge  $\approx 0.7 \times$  mean**



# Tempo di raccolta della carica e diffusione

❑ Nel rivelatore (giunzione p-n inversamente polarizzata) i portatori di carica si muovono sotto l'azione di un campo elettrico.

❑ Il tempo necessario per attraversare il volume sensibile è detto **tempo di raccolta della carica**.

❑ Consideriamo un rivelatore parzialmente svuotato. Il tempo necessario per una carica originata in  $x_0$  per raggiungere la posizione  $x$  è:

$$v = \mu \cdot E = \frac{dx}{dt} \Rightarrow t(x) = \int_{x_0}^x \frac{dx}{v} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{\mu \cdot E(x)} = \frac{1}{\mu E_0} \int_{x_0}^x \frac{1}{w-x} dx =$$

$$E(x) = \frac{q}{\varepsilon} N_d (x - x_N)$$

$$-\frac{1}{\mu E_0} \ln \frac{w-x}{w-x_0} = -\frac{\varepsilon}{\mu q N_d} \ln \frac{w-x}{w-x_0}$$

❑ Nel caso di un **rivelatore totalmente svuotato** (o in overdepletion) possiamo considerare un campo elettrico medio

$$t(x_0 = d) = \frac{d}{v} = \frac{d}{\mu \bar{E}} = \frac{d^2}{\mu V}$$

Se  $d = 300 \mu\text{m}$ ,  $E = 2.5 \text{ kV/cm}$

→  $t_d = 9 \text{ ns}$  per gli elettroni  
 $27 \text{ ns}$  per le lacune

❑ Durante il tempo di drift verso gli elettrodi, la distribuzione di carica si allarga per diffusione. Dopo un tempo  $t$  la larghezza (rms) della distribuzione è:

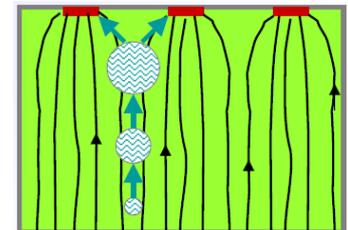
$$\sigma_D = \sqrt{2Dt}$$

con

$$D = \frac{kT}{q} \mu$$

Coefficiente di diffusione

(Valore tipico:  
 $\sigma_D = 6 \mu\text{m}$ )



# Segnale: carica raccolta o indotta?

❑ Quando inizia il segnale in corrente?

a) quando la carica raggiunge l'elettrodo?

b) non appena la carica inizia a muoversi?

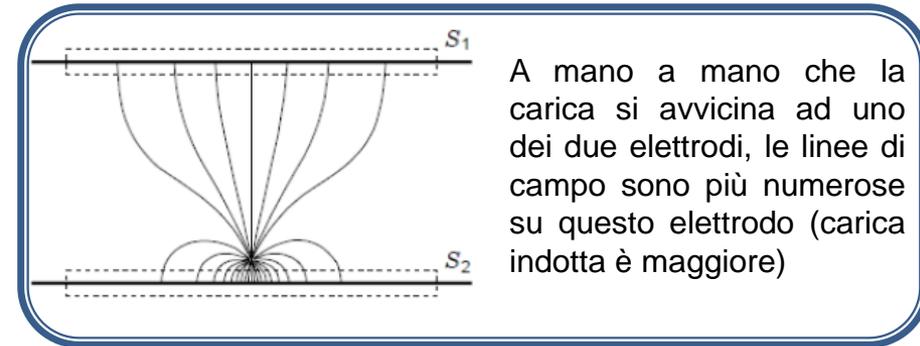
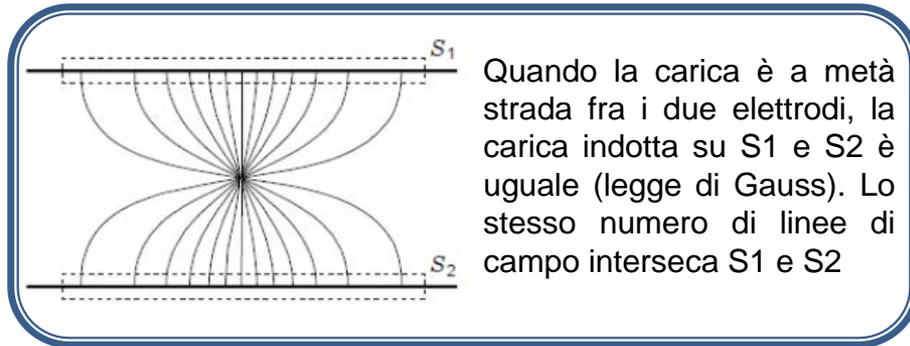
❑ Sebbene si parli di “raccolta di carica”, la risposta corretta è la seconda!

❑ Quando una coppia e-h viene creata, c'è un **accoppiamento** fra elettrodi e cariche (sia positive che negative).

❑ **Non appena le cariche si muovono, la carica indotta agli elettrodi cambia, cioè una corrente scorre sugli elettrodi!**

# Carica indotta in un elettrodo

Consideriamo una carica che viene generata vicino ad un elettrodo:



A mano a mano che la carica si muove attraverso la giunzione, la carica indotta sugli elettrodi cambia continuamente

Una corrente scorre nel circuito non appena le cariche cominciano a muoversi

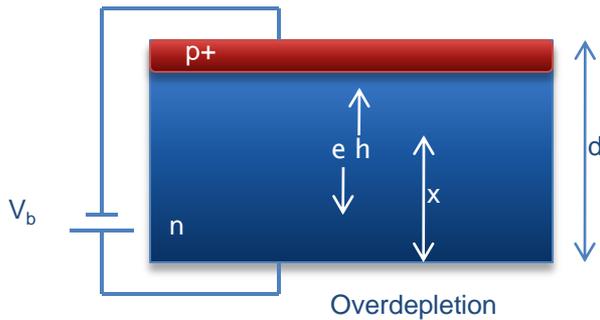
L'intensità della corrente indotta dipende dall'accoppiamento fra carica ed elettrodi e viene espresso matematicamente dal Teorema di Ramo

Corrente istantanea indotta su elettrodo k dal movimento del portatore di carica q (in posizione x):

$$I_k = -q\vec{v}(x) \cdot \vec{E}_Q(x)$$

dove  $v(x)$  (e la traiettoria delle cariche che driftano) dipende dal campo elettrico  $E$  applicato, mentre  $E_Q$  è il campo elettrico "virtuale" determinato applicando all'elettrodo k potenziale 1 e agli altri elettrodi potenziale 0

# Teorema di Ramo: esempio



$$I_k = -q\vec{v}(x) \cdot \vec{E}_Q(x)$$

Dal momento che elettroni e lacune si muovono in direzioni opposte, inducono, nello stesso elettrodo, una **corrente dello stesso segno**

**Esempio:** geometria a facce parallele con campo elettrico costante (rivelatore con un grande overbias). LA corrente indotta sull'elettrodo è:

$$\left. \begin{aligned} v &= \mu E = \mu \frac{V_b}{d} \\ E_Q &= \frac{1}{d} \end{aligned} \right\} \left( E = \frac{V_b}{d} \right)$$

$$i = qvE_Q = q\mu \frac{V_b}{d} \frac{1}{d} = q\mu \frac{V_b}{d^2}$$

Campo elettrico e campo elettrico "virtuale" (weighting field) costanti  $\rightarrow$  corrente costante finché la carica raggiunge il terminale

Supponiamo che una coppia e-h venga generata in posizione x a partire dall'elettrodo positivo.

□ Tempo di raccolta per elettroni e lacune

□ Carica indotta dal moto degli elettroni e delle lacune:

$$t_{ch} = \frac{d-x}{v_h} = \frac{(d-x)d}{\mu_h V_b} \quad t_{ce} = \frac{x}{v_e} = \frac{xd}{\mu_e V_b}$$

$$Q_h = q_e \mu_h \frac{V_b}{d^2} \frac{(d-x)d}{\mu_h V_b} = q_e \left(1 - \frac{x}{d}\right) \quad Q_e = q_e \mu_e \frac{V_b}{d^2} \frac{xd}{\mu_e V_b} = q_e \frac{x}{d}$$

Se  $x = d/2$ , dopo un tempo  $t_{ce} = \frac{d^2}{2\mu_e V_b}$

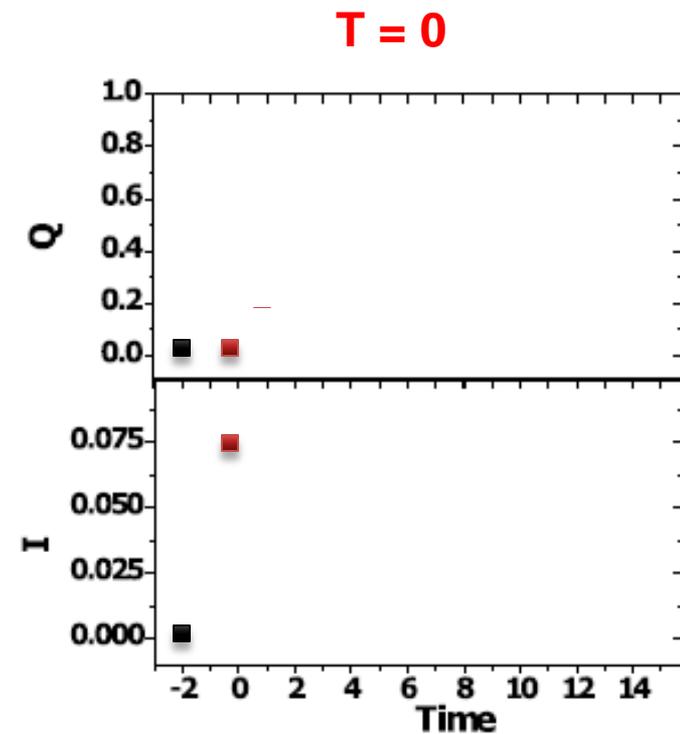
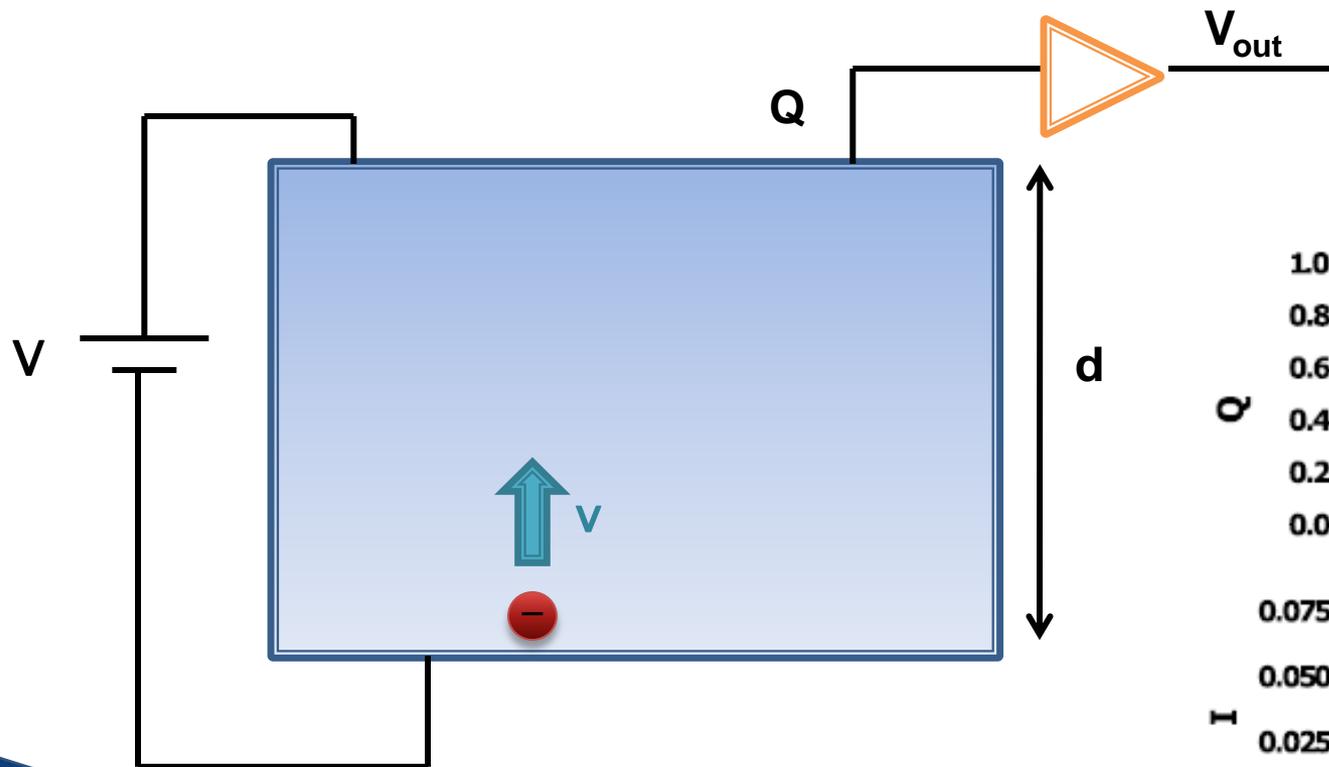
l'elettrone ha indotto una carica  $q_e/2$ . A questo stesso tempo, la lacuna, per la

sua mobilità ridotta ( $\mu_h = \mu_e/3$ ), ha indotto una carica  $q_e/6$ , per un totale di una carica  $2/3q_e$ . Dopo l'ulteriore tempo necessario per la raccolta della carica, ( $t_{ch} - t_{ce}$ ), viene indotta la carica restante  $q_e/3$ , per un totale di una carica  $q_e$ .

- Elettroni e lacune contribuiscono in egual misura alla corrente su entrambi gli elettrodi
- La corrente istantanea è la stessa in ogni momento (anche se di segno opposto) su tutti gli elettrodi
- L'equazione di continuità (legge di Kirchhoff) è soddisfatta

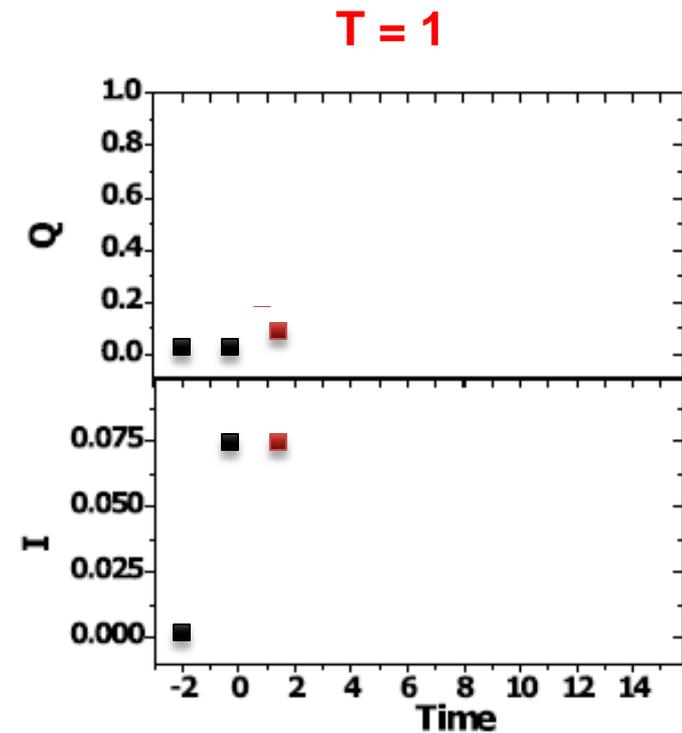
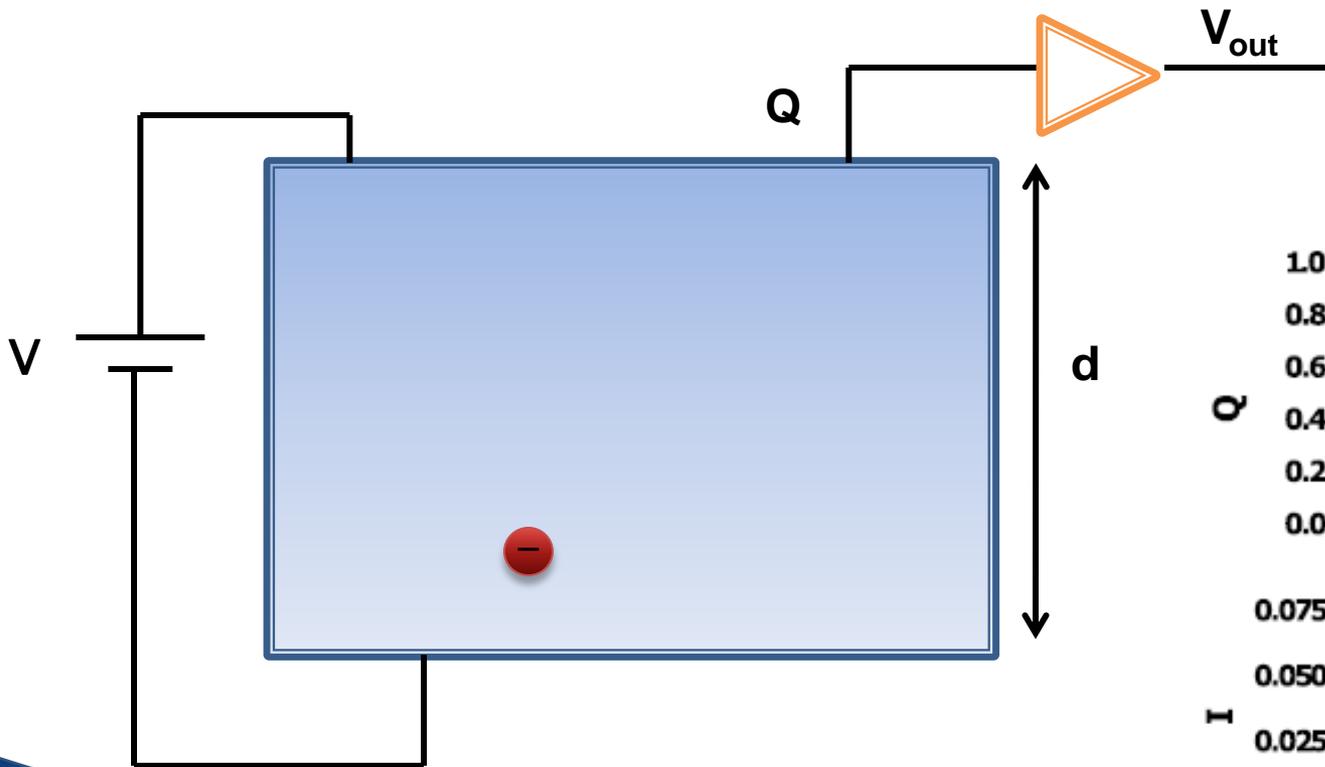
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



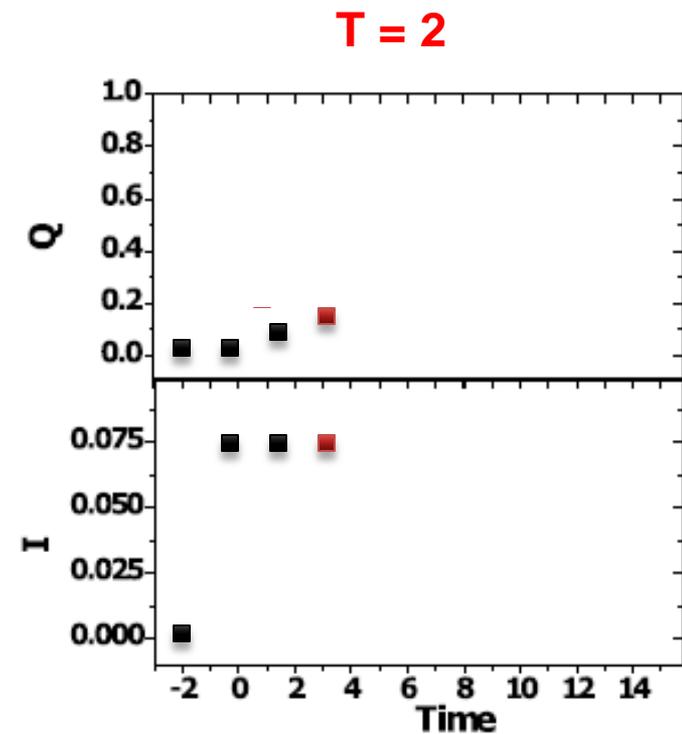
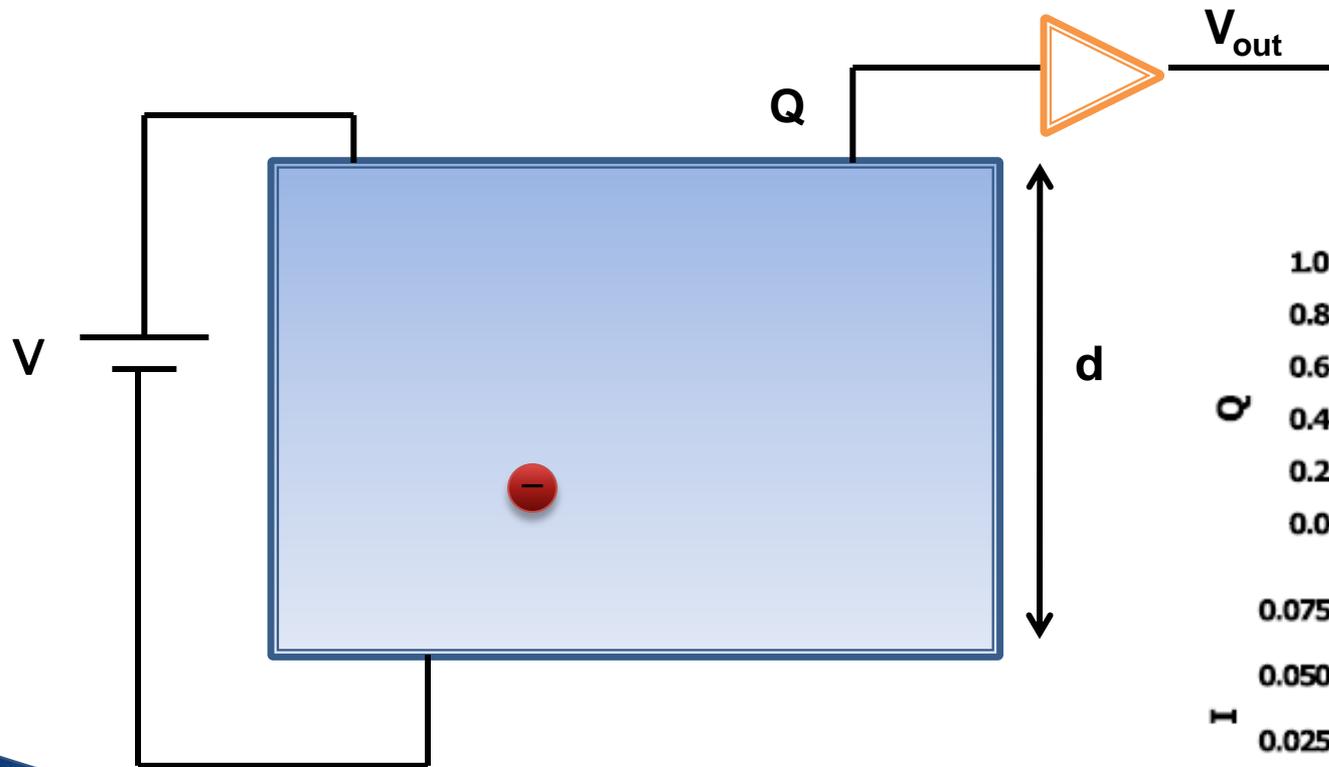
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



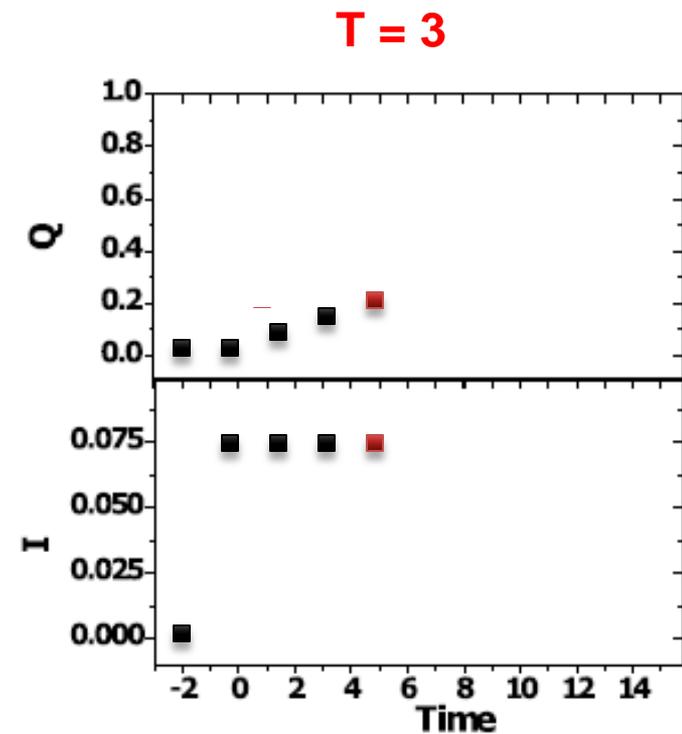
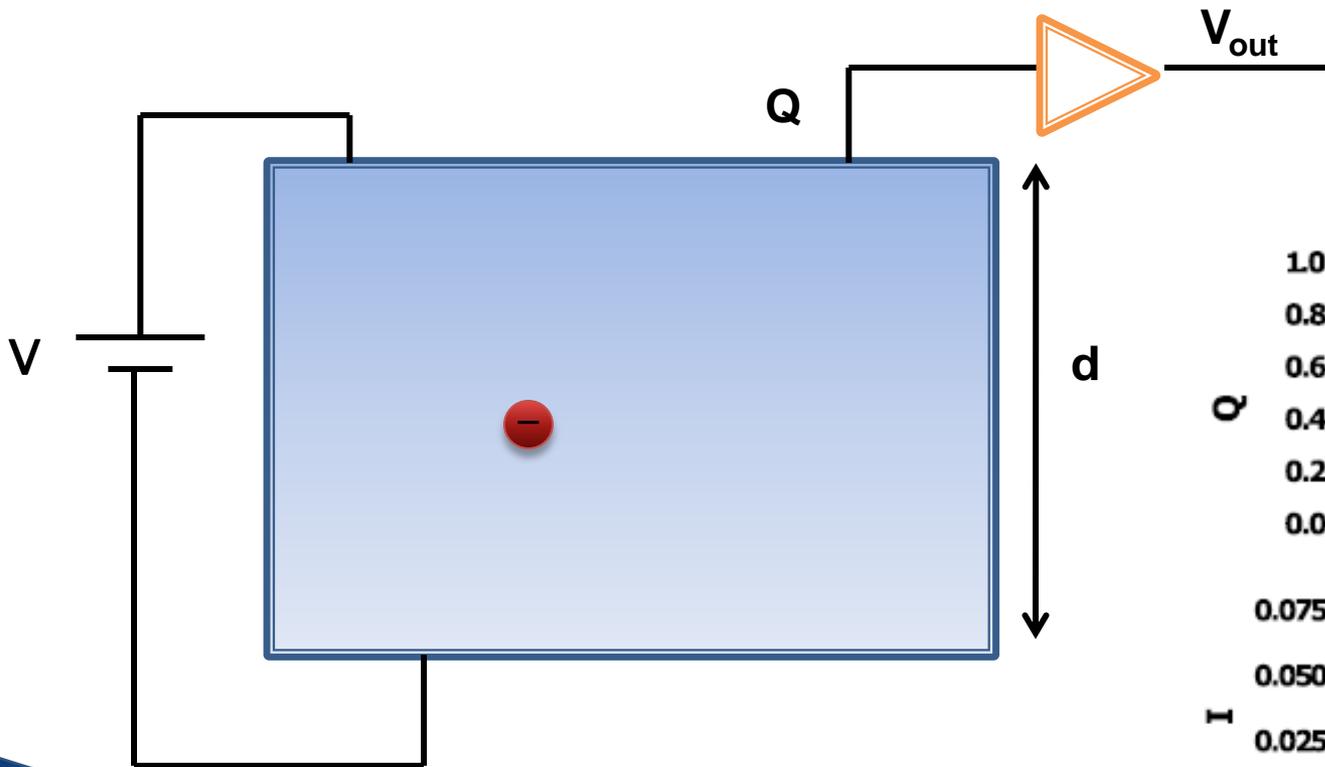
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



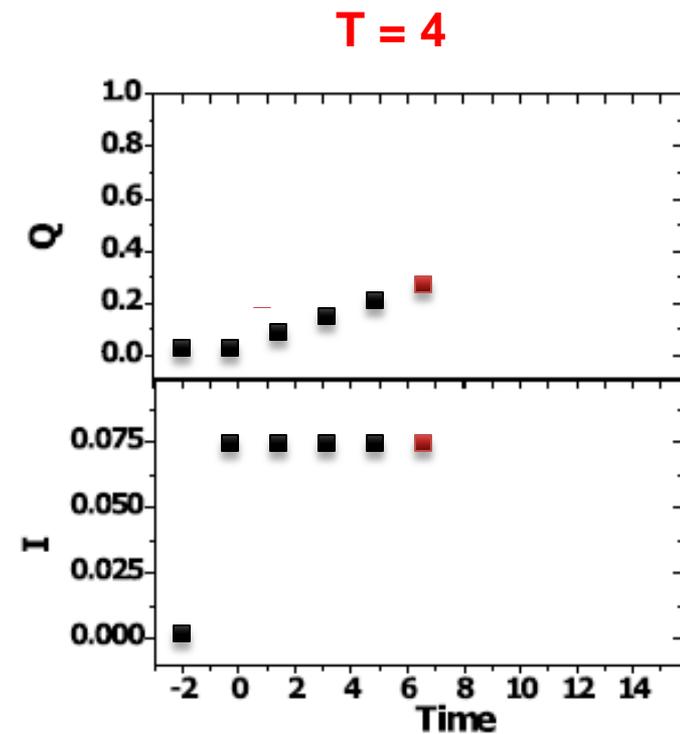
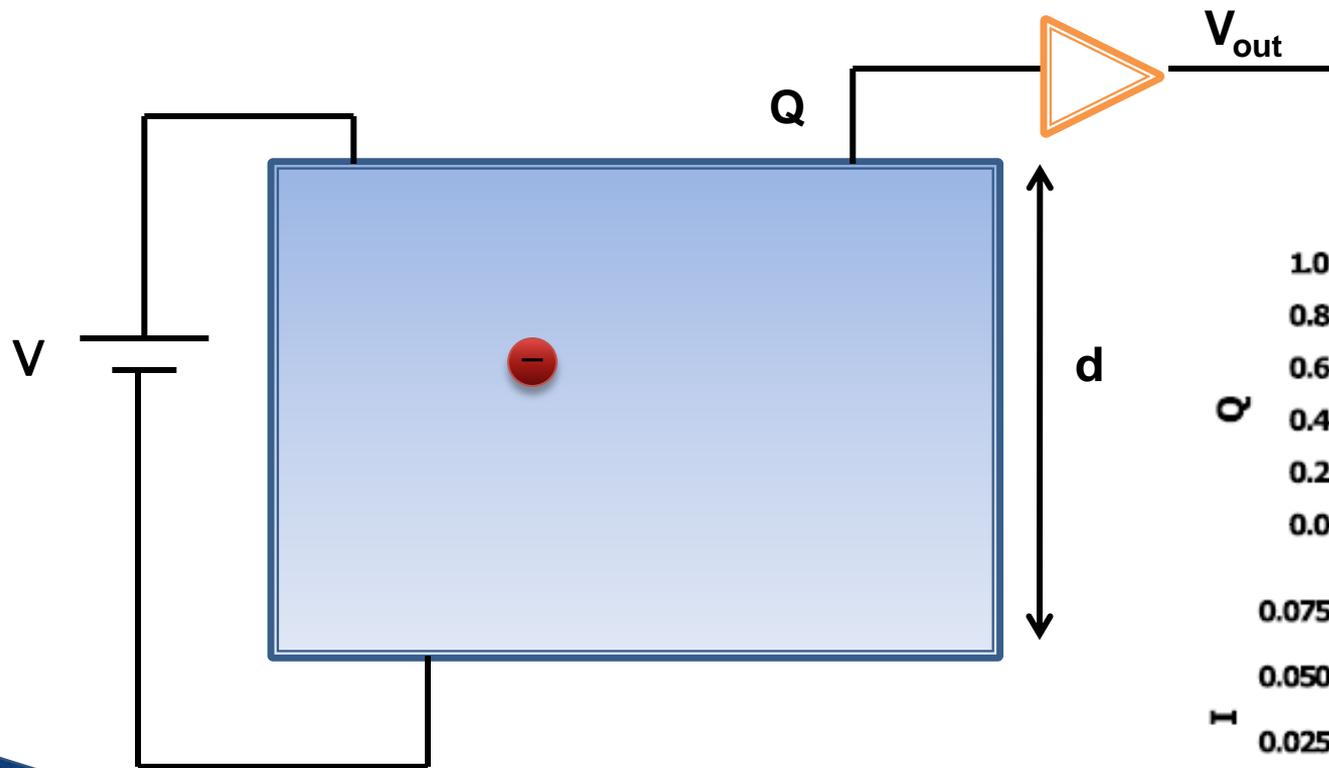
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



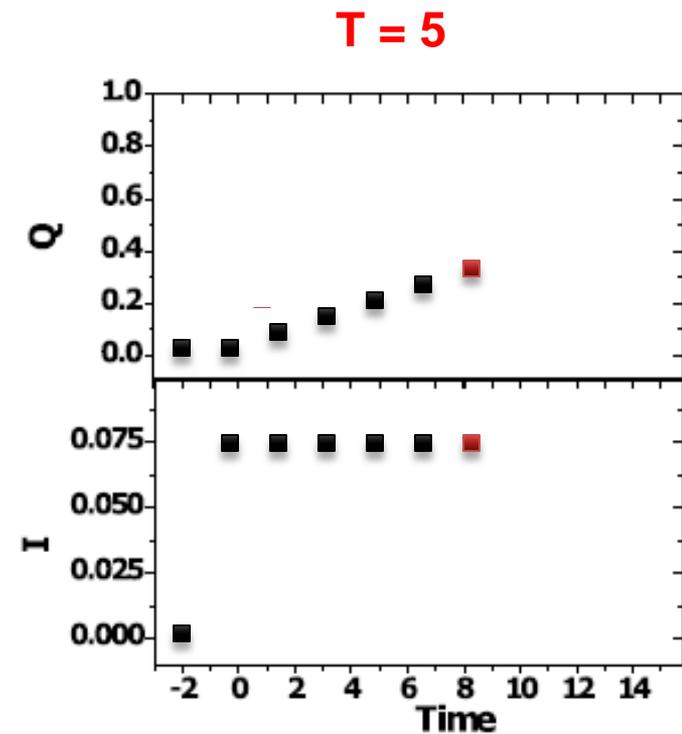
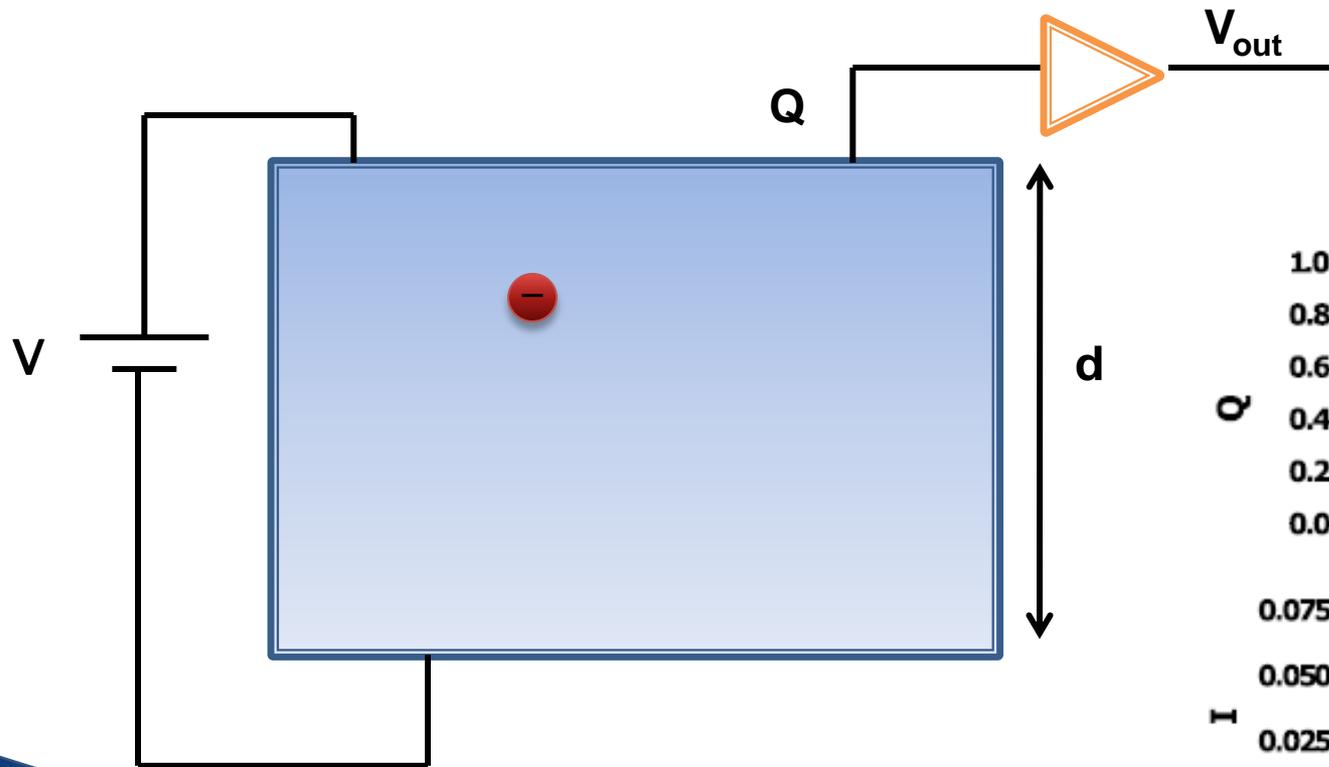
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



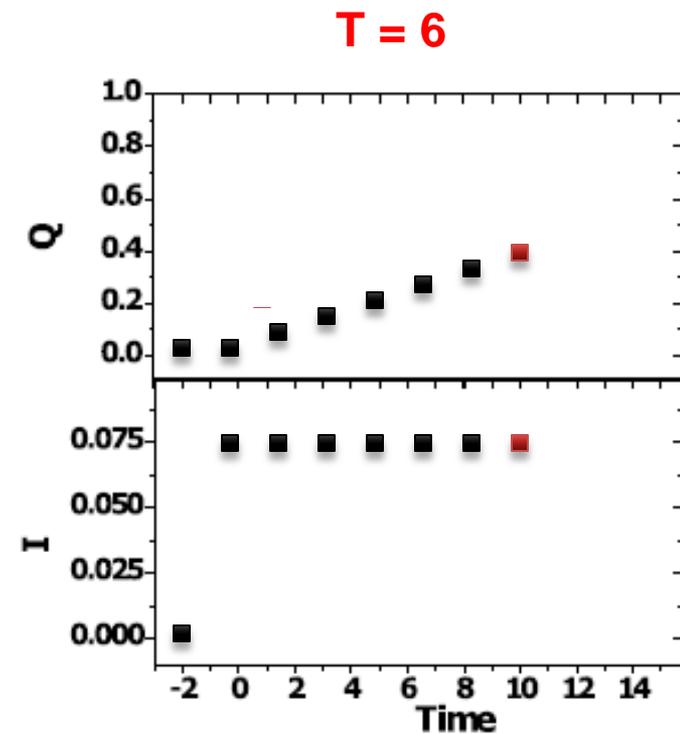
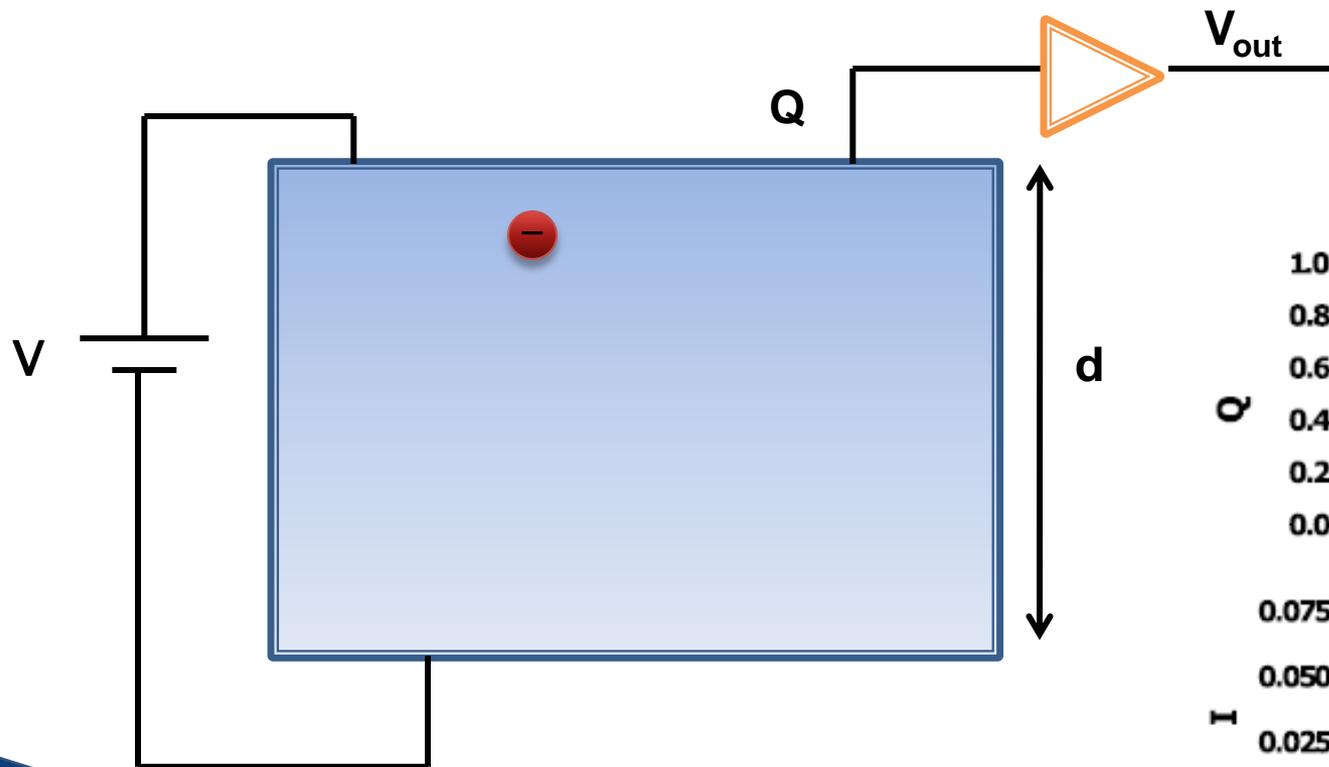
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



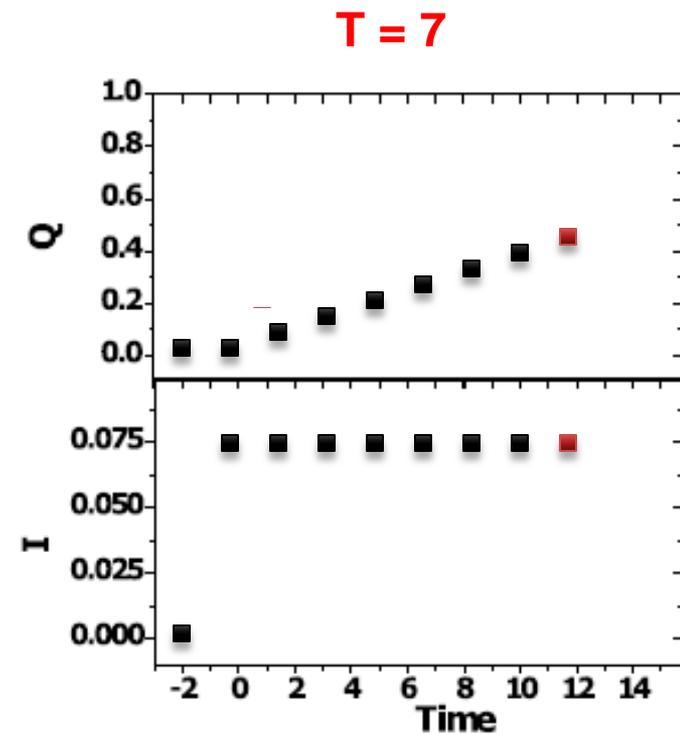
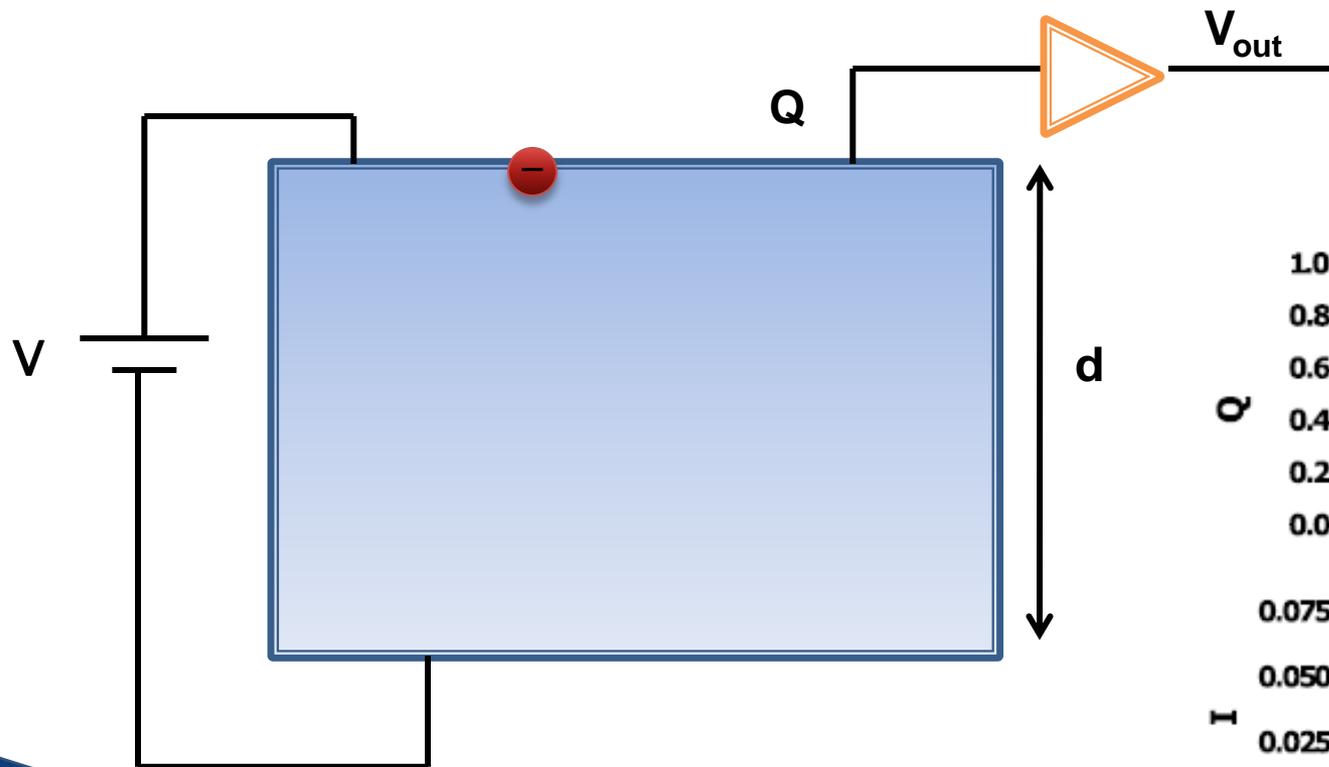
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



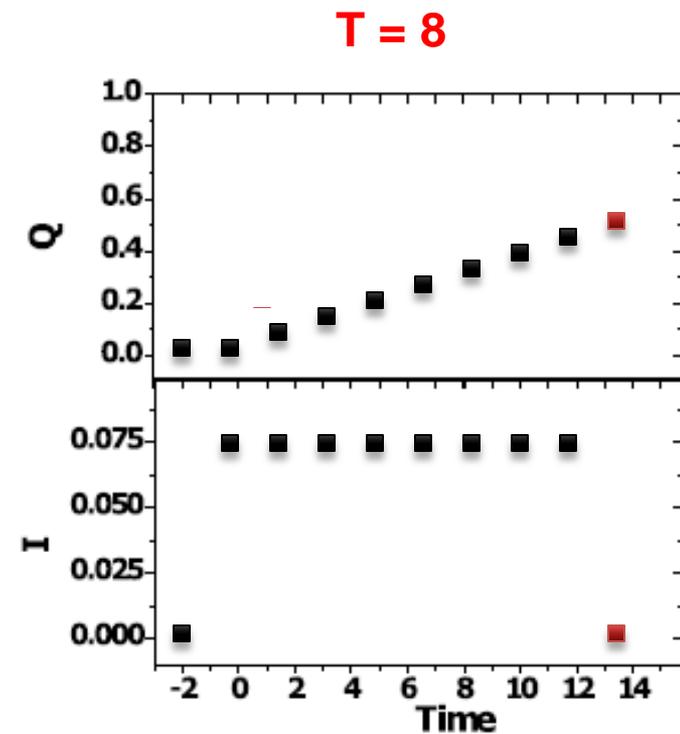
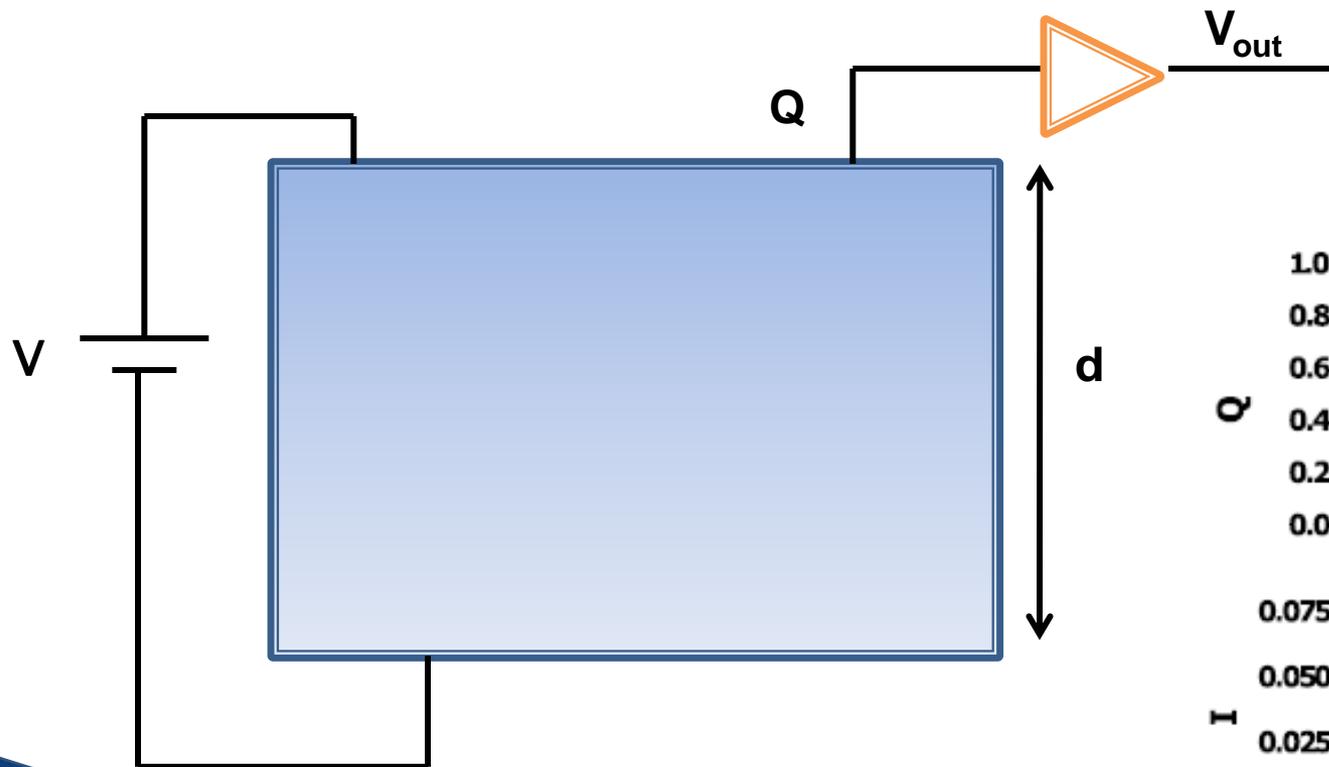
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



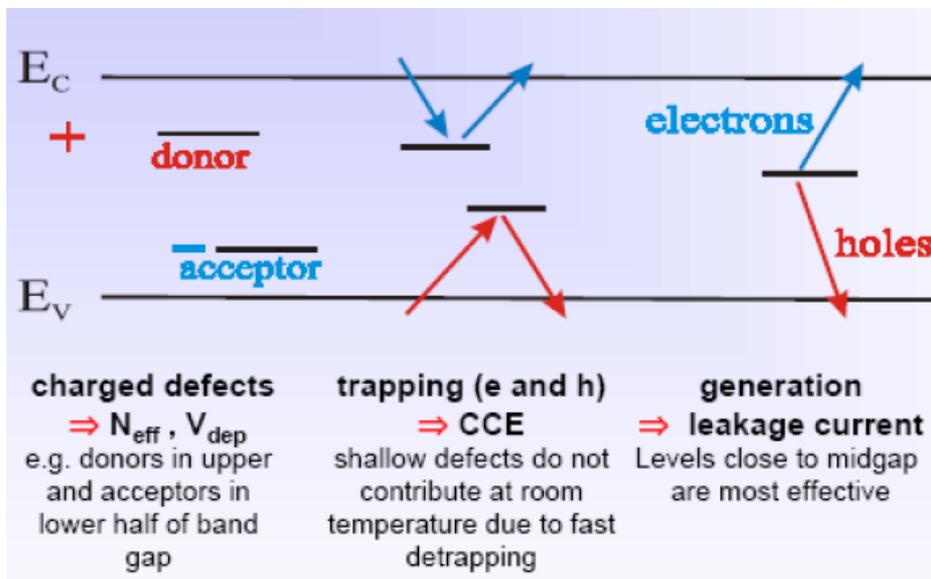
# Carica indotta

- ▶ Corrente indotta:  $I(t) = \frac{q}{t} = q \cdot \frac{v}{d}$
- ▶ Carica indotta:  $Q(t) = \int_0^T I(t) dt$



# Danno da radiazione

- ▶ I rivelatori sviluppati per operare in esperimenti di Fisica delle Alte Energie devono essere progettati e testati per poter sopravvivere agli alti livelli di radiazione cui saranno esposti durante il loro funzionamento
- ▶ La radiazione può **danneggiare il silicio cristallino** spostando alcuni atomi del reticolo



□ **Silicio: danno sul reticolo (bulk damage, displacement damage) dovuto a Non Ionizing Energy Loss (NIEL) ( $p$ ,  $n$ ,  $\pi$ )**

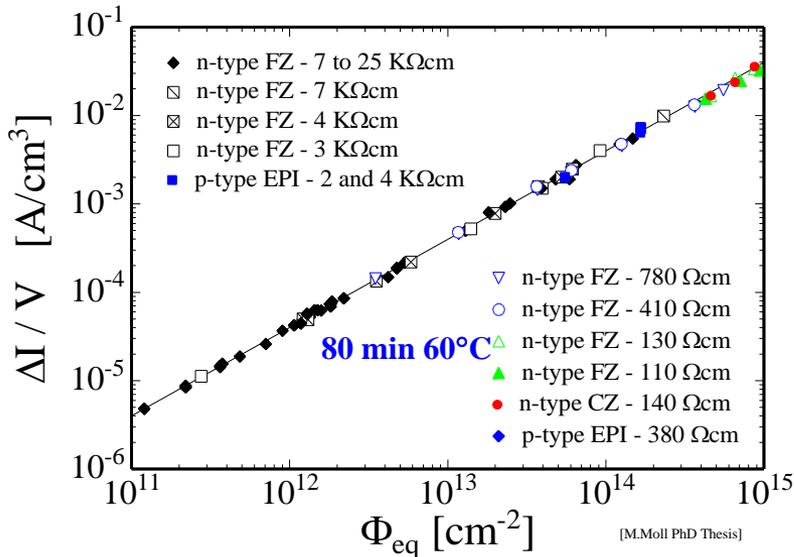
- Cambio della **tensione di svuotamento** (maggiori tensioni operative, svuotamento non totale)
- Aumento della **corrente di leakage** (cooling)
- Diminuzione dell'**efficienza di raccolta della carica** (charge collection efficiency, CCE)

□ **Ossido: danno superficiale dovuto a Ionizing Energy Loss (NIEL)**

- dovuto all'**accumulo di cariche positive** all'interno degli ossidi ( $\text{SiO}_2$ ) o all'interfaccia  $\text{Si/SiO}_2$
- può influire sul noise, sul breakdown

# Effetti del danno sul reticolo (1)

## Variation of leakage current



$$\alpha = \frac{\Delta I}{V \cdot \Phi_{eq}}$$

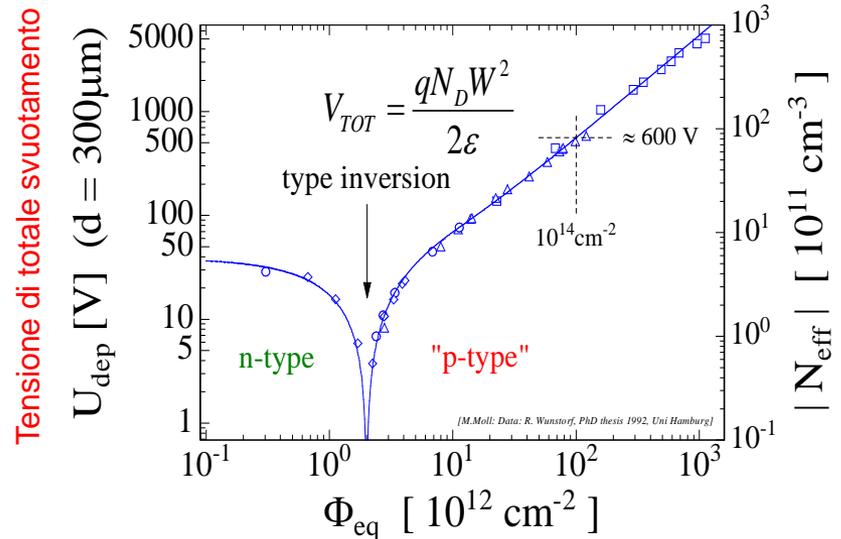
□ **Damage parameter  $\alpha$**

Corrente di leakage per unità di volume e fluenza delle particelle

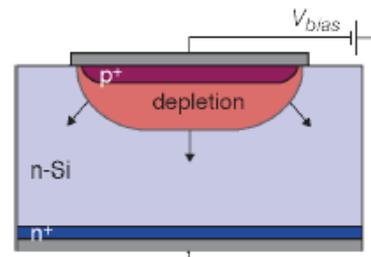
$\alpha$  è costante su un range di parecchi ordini di grandezza di fluenza e non dipende dal tipo di Silicio (può essere usata per misurare la fluenza)

Dipende da T e dall'annealing

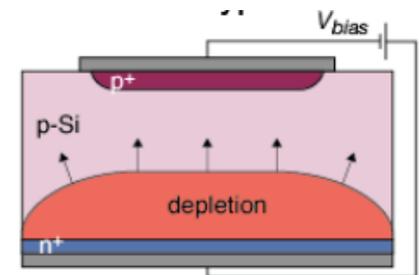
## Change of depletion voltage



before inversion



after inversion

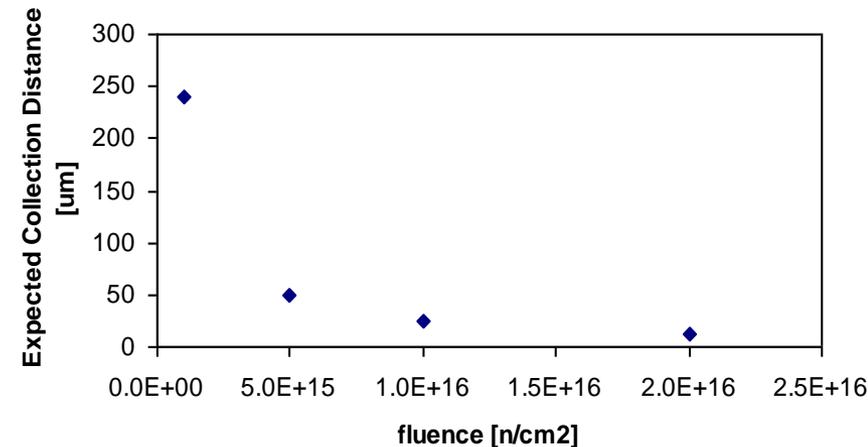
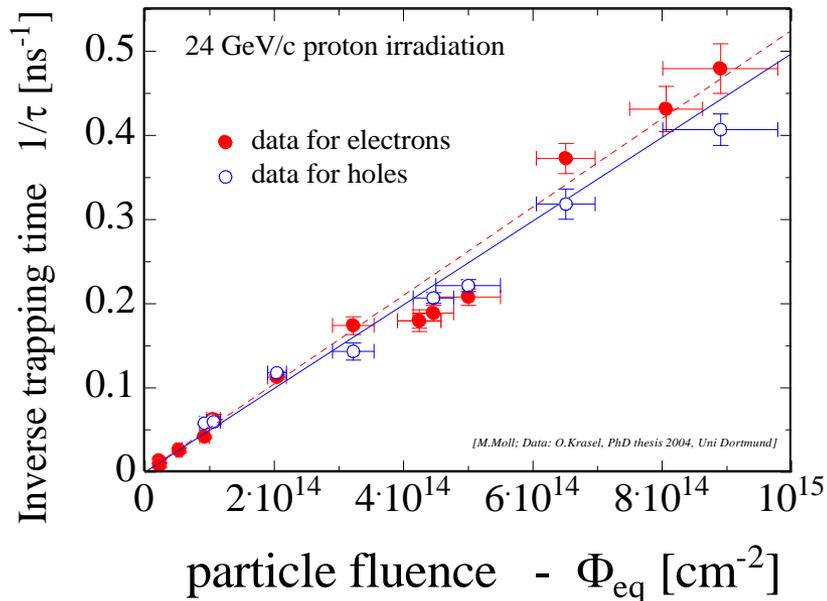


# Effetti del danno sul reticolo (2)

## Deterioramento dell'efficienza di raccolta della carica

$$Q_{e,h}(t) = Q_{0e,h} \exp\left(-\frac{1}{\tau_{eff\ e,h}} \cdot t\right) \quad \text{dove} \quad \frac{1}{\tau_{eff\ e,h}} \propto N_{defects}$$

Aumento dell'inverso del "trapping time"  
( $1/\tau$ ) con la fluenza

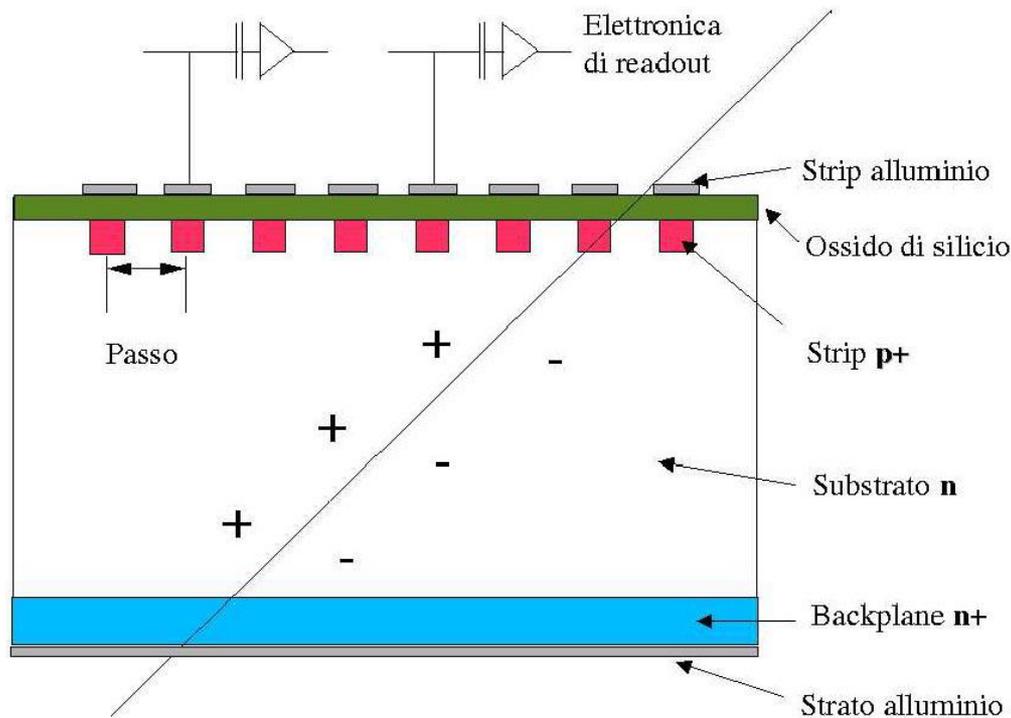


Collection distance:  $\lambda_{av}$  :

- $\lambda_{av}$  dopo  $10^{15} n_{eq} cm^{-2}$ : 200 $\mu m$  ( $\tau_{eff} = 2$  ns)  
Carica attesa: ~16ke.
- $\lambda_{av}$  dopo  $0^{16} n_{eq} cm^{-2}$ : 20 $\mu m$  ( $\tau_{eff} = 0.2$  ns)  
Carica attesa: <1.6ke : rivelatore inefficiente!

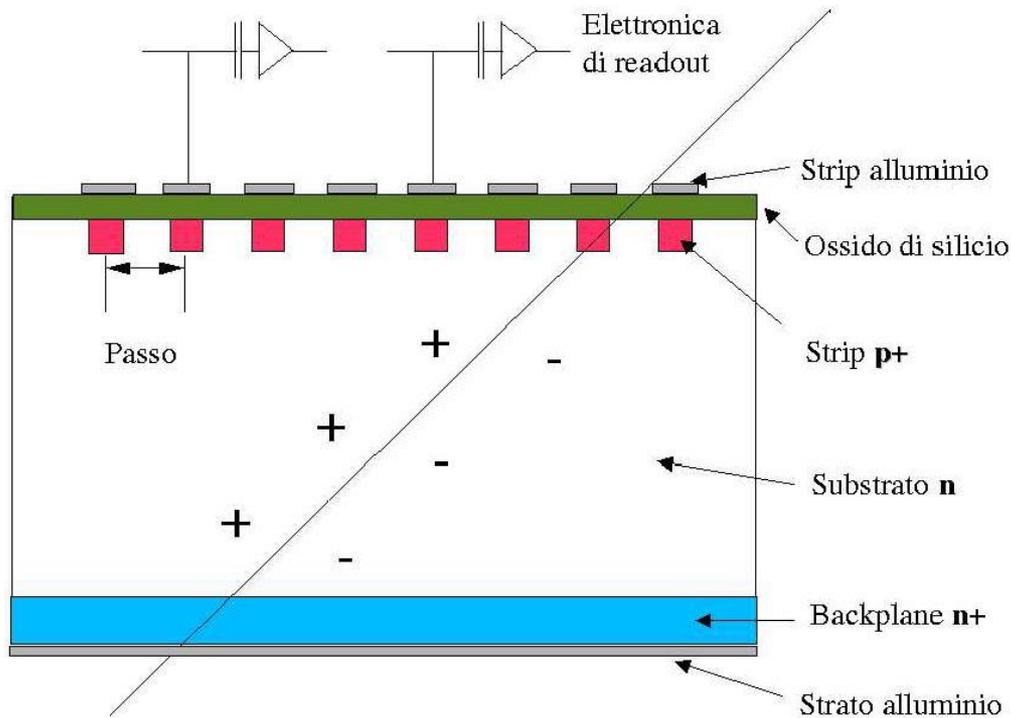
# Rivelatore di posizione: microstrip (1)

Rivelatore a microstrip: giunzione p-n con elettrodo segmentato



- **passo** (distanza tra due strip adiacenti, fissa per tutto il rivelatore): da  $25\mu\text{m}$  a  $240\mu\text{m}$ .
- **spessore**: circa  $300\mu\text{m}$ .
- **larghezza** delle strip: qualche  $\mu\text{m}$ .
- **accoppiamento DC**: se lo strato di alluminio è depositato direttamente sulle strip p+ (Direct Current);
- **accoppiamento AC**: se sotto l'alluminio viene impiantato uno strato di biossido di silicio, che funge da capacità di accoppiamento e impedisce il passaggio della componente continua della corrente (la corrente di buio, dovuta alla polarizzazione) all'ingresso dell'elettronica (Alternating Current).

# Rivelatore di posizione: microstrip (2)

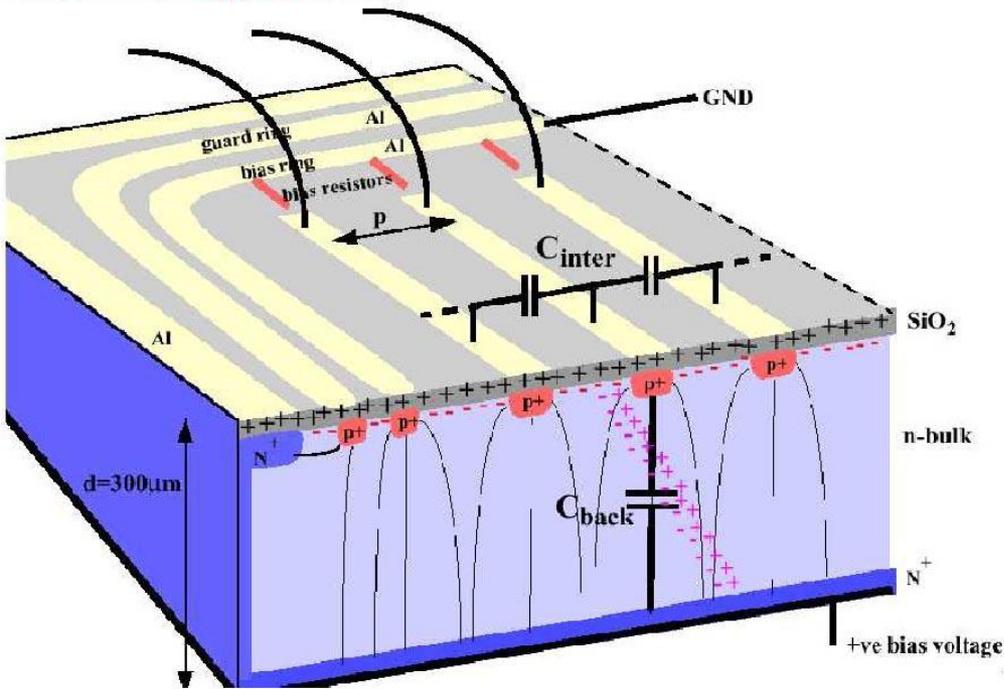


## • Rivelatore a strip di tipo n:

- giunzione p+n:  $N_a \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$   
 $N_d \approx 1.5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- bulk n:  $\rho > 2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  (spessore 300 $\mu\text{m}$ )
- Tipica tensione operativa: 100V
- $E = 3 \text{ kV/cm}$
- Velocità drift (deriva):  
elettroni:  $4.45 \cdot 10^6 \text{ cms}^{-1}$   
lacune:  $1.6 \cdot 10^6 \text{ cms}^{-1}$
- Tempo di raccolta: elettroni: 7ns  
lacune: 19ns
- strato n+ per migliorare la qualità del contatto sul substrato
- metallizzazione (Al)

# Microstrip: Bias-ring e guard-ring

## Sensor Design Baseline



Vista prospettica di una parte di un tipico rivelatore a microstrip di silicio

□ L'**anello di bias** circonda tutto il perimetro del rivelatore, e collega tramite delle resistenze costituite da una serpentina di polisilicio (bias resistors), ognuna delle strip fornendo loro la tensione che permette lo svuotamento della giunzione.

□ Intorno all'anello di bias vengono realizzati uno o più **anelli di guardia** ( guard ring ) che permettono di modellare il campo elettrico ai bordi del rivelatore e interrompere le correnti superficiali.

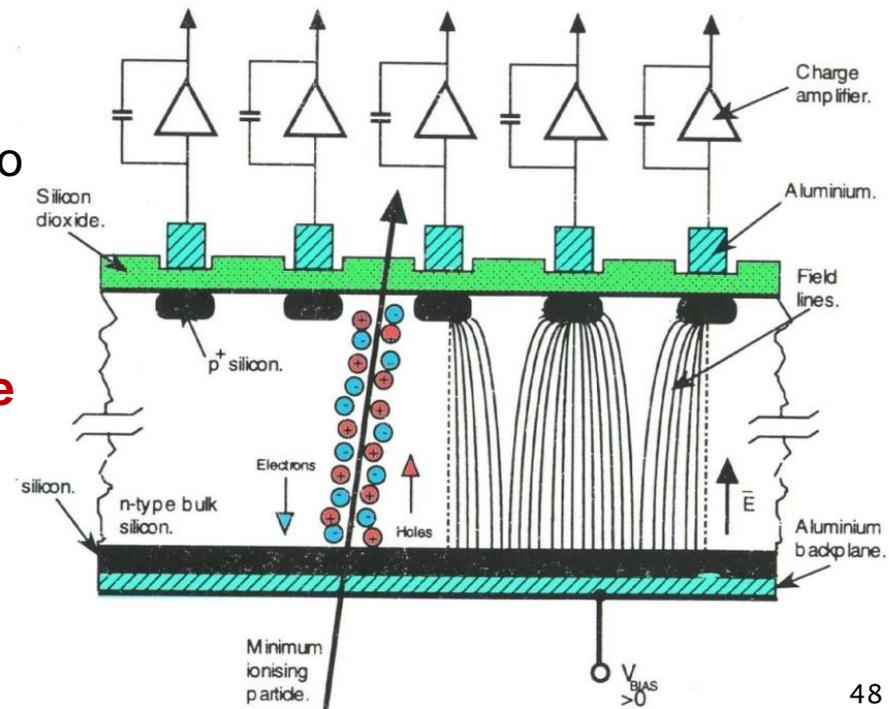
□ Alle estremità delle linee di alluminio sono realizzati dei "**pads**", ovvero dei contatti metallici particolarmente larghi, che permettono la microsaldatura tra le strips e i canali dell'elettronica di front-end

# Microstrip: segnale

- ▶ Nell'attraversare un rivelatore a microstrip di Silicio, una particella carica rilascia coppie elettrone-lacuna in tutto lo spessore del rivelatore (circa 24000 coppie e/h per una MIP per uno spessore standard di 300um).
- ▶ Le coppie generate all'interno della zona svuotata derivano verso gli elettrodi. La corrente indotta dal moto di deriva (drift) crea il **segnale**, che deve venire amplificato da un amplificatore esterno connesso a *ciascuna* strip.
- ▶ Dal segnale generato su ciascuna strip, si può dedurre la **posizione** di attraversamento della particella ionizzante

La **risoluzione in posizione** è il parametro fondamentale dei rivelatori dei sistemi di tracciatura.

**Da cosa dipende la risoluzione spaziale in un rivelatore a microstrip?**



# Microstrip: risoluzione spaziale

Dipende da vari fattori, alcuni legati alla fisica del dispositivo, altri al disegno del sistema

## Processi fisici

- Fluttuazioni statistiche della perdita di energia (raggi delta)
- Diffusione dei portatori di carica
- Scattering multiplo

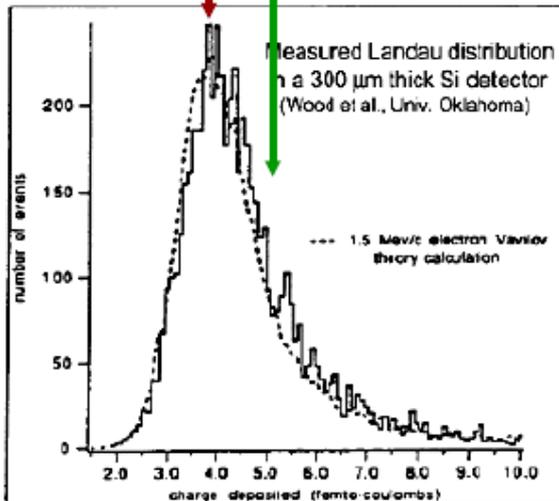
## Parametri esterni

- Sistema di lettura: binario (discriminatore a soglia) o analogico
- Distanza fra le strip (pitch)
- Rapporto segnale-rumore

# Risoluzione spaziale: fluttuazioni nella perdita di energia

Most probable charge  $\approx 0.7 \times$  mean

Mean charge



✓ I rivelatori a Silicio sono sottili e assorbono solo una piccola frazione dell'energia delle particelle che li attraversano (300–500  $\mu\text{m}$ )

✓ La perdita di energia  $dE/dx$  segue la **distribuzione di Landau** (una funzione asimmetrica con una lunga coda di depositi di energia molto elevati)

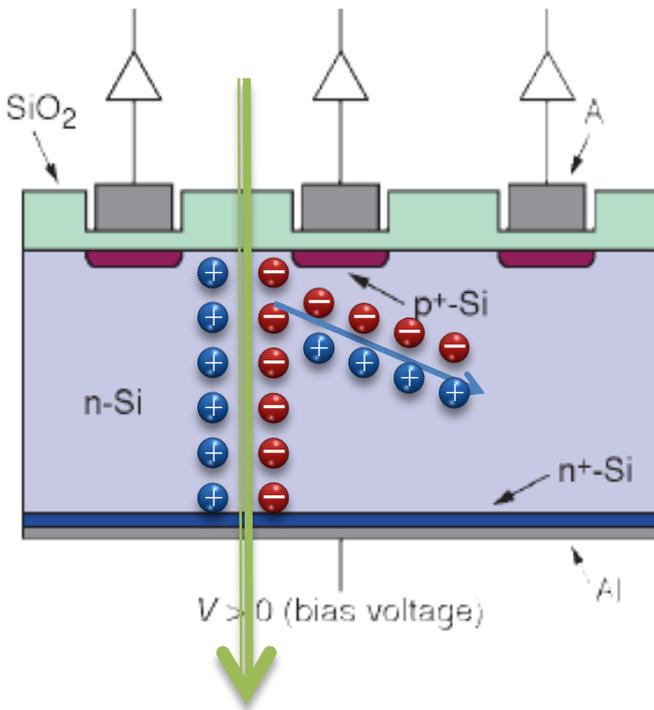
✓ La coda nella distribuzione della perdita di energia è dovuta ai raggi delta (**delta-rays**,  $\delta$ -electrons). I delta-rays hanno un'energia elevata (keV) e sono prodotti da collisioni rare fra la particella incidente e gli elettroni del dispositivo.

La probabilità di produrre un delta-ray è piccola,

MA

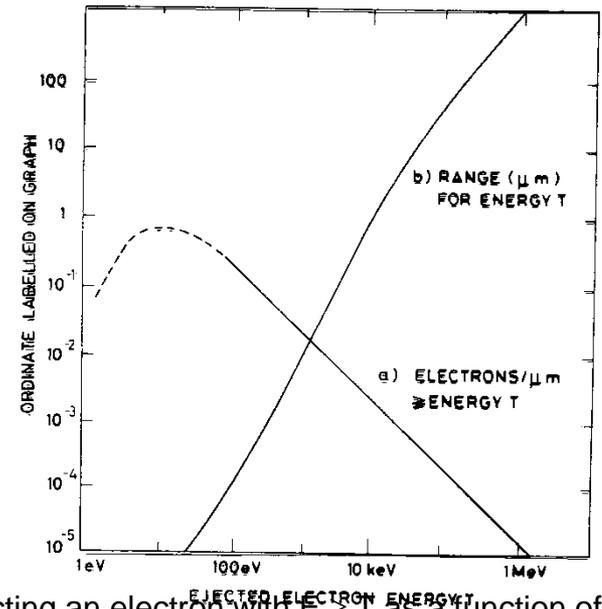
- hanno un range elevato
- possono produrre coppie e/h lungo la loro traccia!

# Risoluzione spaziale: delta-rays

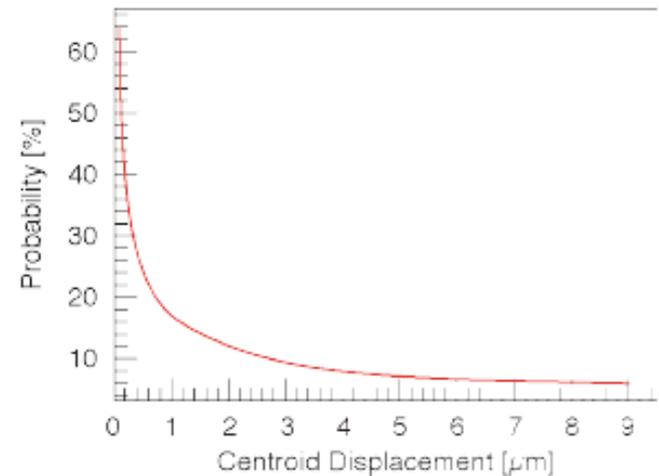


Sono rari ma

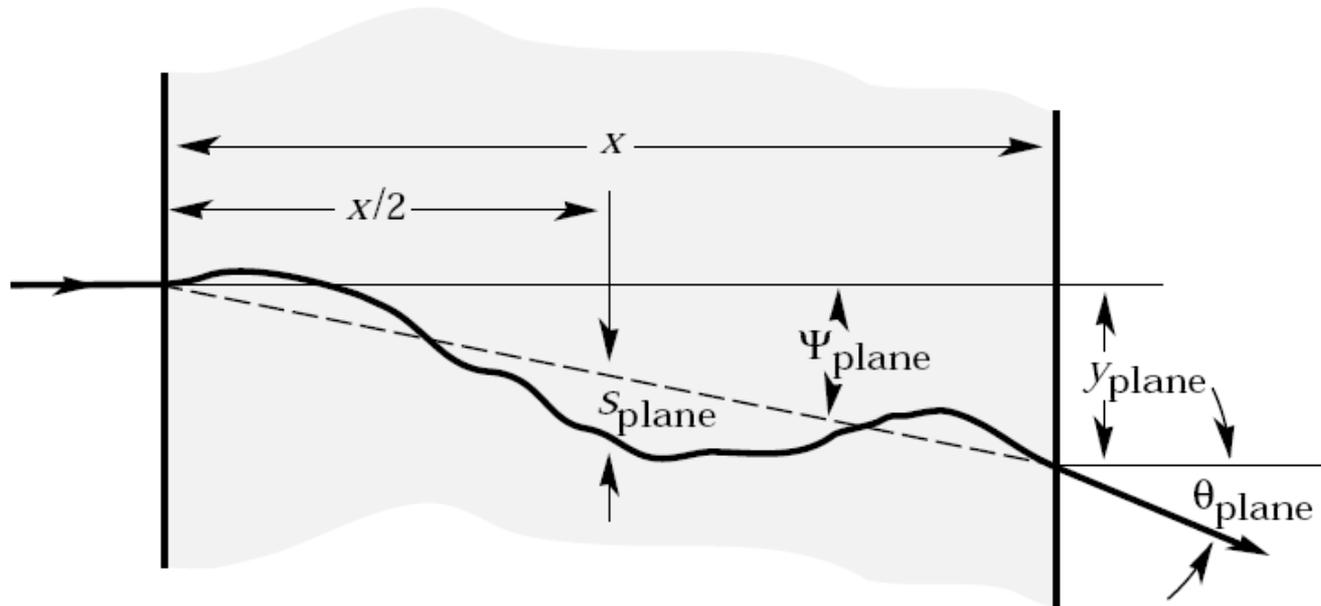
- Possono spostare la posizione della traccia che si ricostruisce
- L'errore che si compie è nell'ordine di qualche  $\mu\text{m}$



- a) Probability of ejecting an electron with  $E \geq T$  as a function of  $T$
- b) Range of electron as a function of energy in silicon



# Risoluzione spaziale: scattering multiplo



Nell'attraversare lo spessore del rivelatore, le particelle non solo perdono energia, ma vengono anche deviate (multiple scattering)

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

# Risoluzione spaziale: diffusione (1)

➤ Quando una particella ionizzante attraversa il sensore, i portatori di carica sono creati in una regione di  $\sim 1\mu\text{m}$  attorno alla traccia della particella

➤ Durante il moto di deriva verso gli elettrodi, le lacune e gli elettroni diffondono (collisioni multiple) e la loro distribuzione è **Gaussiana**;  $dN/N$  è frazione di carica in  $dx$  ad una distanza  $x$  dall'origine e dopo un tempo  $t$

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt} dx$$

$$\sigma_D = \sqrt{2Dt} \quad \text{con} \quad D = \frac{kT}{e} \mu$$

$\sigma_D$ : larghezza root-mean-square della distribuzione di carica

$t$ : tempo di drift

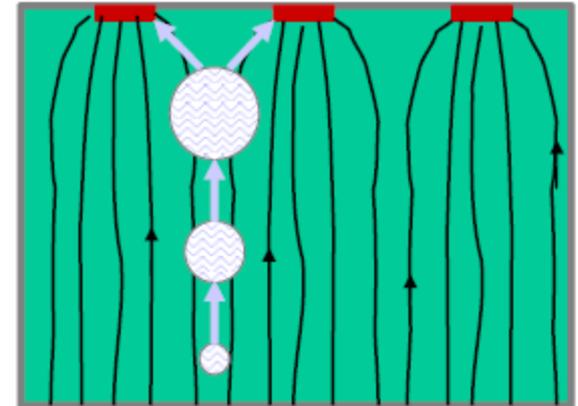
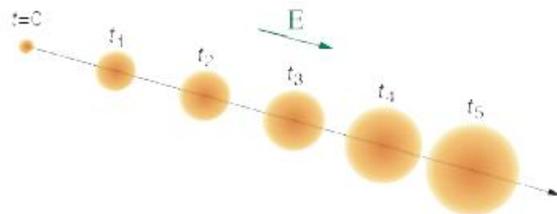
$k$ : costante di Boltzmann

$e$ : carica elettrone

$D$ : coefficiente di diffusione

$T$ : temperatura

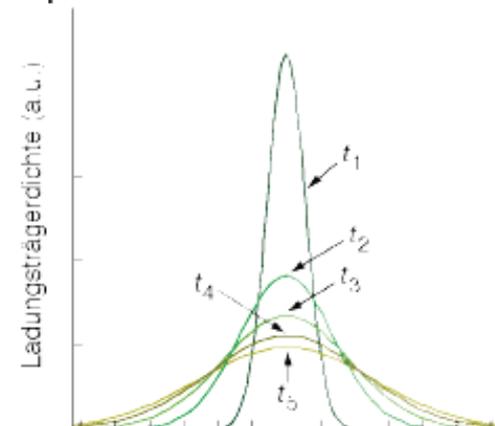
$\mu$ : mobilità dei portatori di carica



$$D \propto \mu, \quad t \propto 1/\mu \rightarrow$$

$\sigma$  è la stessa sia per elettroni che per lacune

Charge density distribution for 5 equidistant time intervals:



# Risoluzione spaziale: diffusione (2)

- La diffusione allarga la distribuzione di carica. Tuttavia, questo ha un effetto positivo per la risoluzione spaziale!



La carica si distribuisce in più di una strip:  
**calcolando il baricentro della distribuzione di carica**  
si riesce ad ottenere una miglior misura della posizione!

- Possibile solo se il sistema di lettura implementato è analogico
- Maggiore è il rapporto segnale-rumore, maggiore è la precisione sull'interpolazione



Il passo delle strip (pitch) e il rapporto segnale-rumore  
determinano la risoluzione spaziale

- Una maggiore suddivisione della carica (charge sharing) si può ottenere inclinando il dispositivo

# Misura di momento

Tracker misura:

- traiettoria della particella (dalla misura della posizione)
- Momento (dal raggio di curvatura in B)
- Ionizzazione

R viene determinato dalla misura della sagitta s

$$\frac{L/2}{R} = \sin \frac{\theta}{2} \approx \theta \quad R = \frac{P}{0.3 \cdot B}$$

$$s = R \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \approx R \left( 1 - \left( 1 - \frac{\theta^2}{8} \right) \right) \approx R \left( \frac{\theta^2}{8} \right) \approx \frac{0.3BL^2}{8p_T}$$

$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2} \Rightarrow ds = dx_2 - dx_1/2 - dx_3/2$$

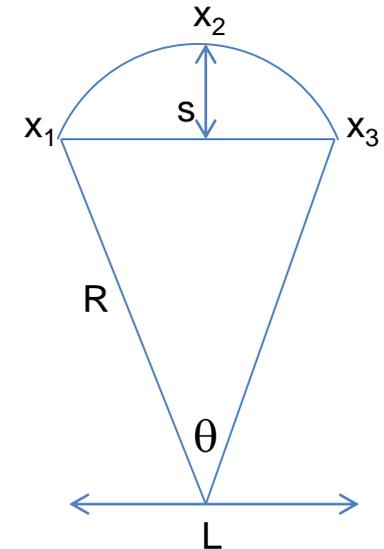
$$\sigma_s^2 = \sigma_x^2 + 2(\sigma_x^2/4) = 3/2 \sigma_x^2$$

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s} = \sqrt{3/2} \sigma_x \frac{8p_T}{0.3BL^2}$$

N=3

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \sqrt{\frac{720}{N+4}} \sigma_x \frac{p_T}{0.3BL^2}$$

N qualunque

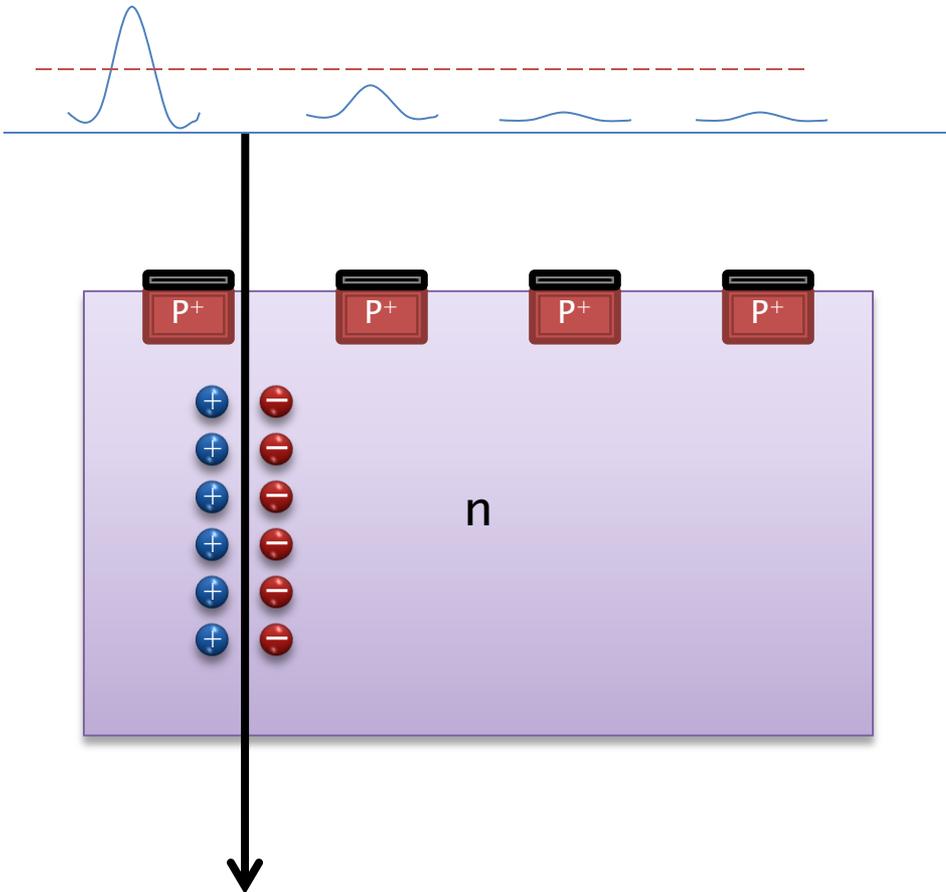


Multiple scattering

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{13.6 \sqrt{L/X_0}}{0.3BL}$$

# Risoluzione spaziale: lettura binaria

Soglia  
output



## Lettura binaria

(segnale sopra una soglia stabilita)

Posizione:  $x = \text{posiz. della strip}$

Risoluzione:  $\sigma_x \approx \frac{p}{\sqrt{12}}$

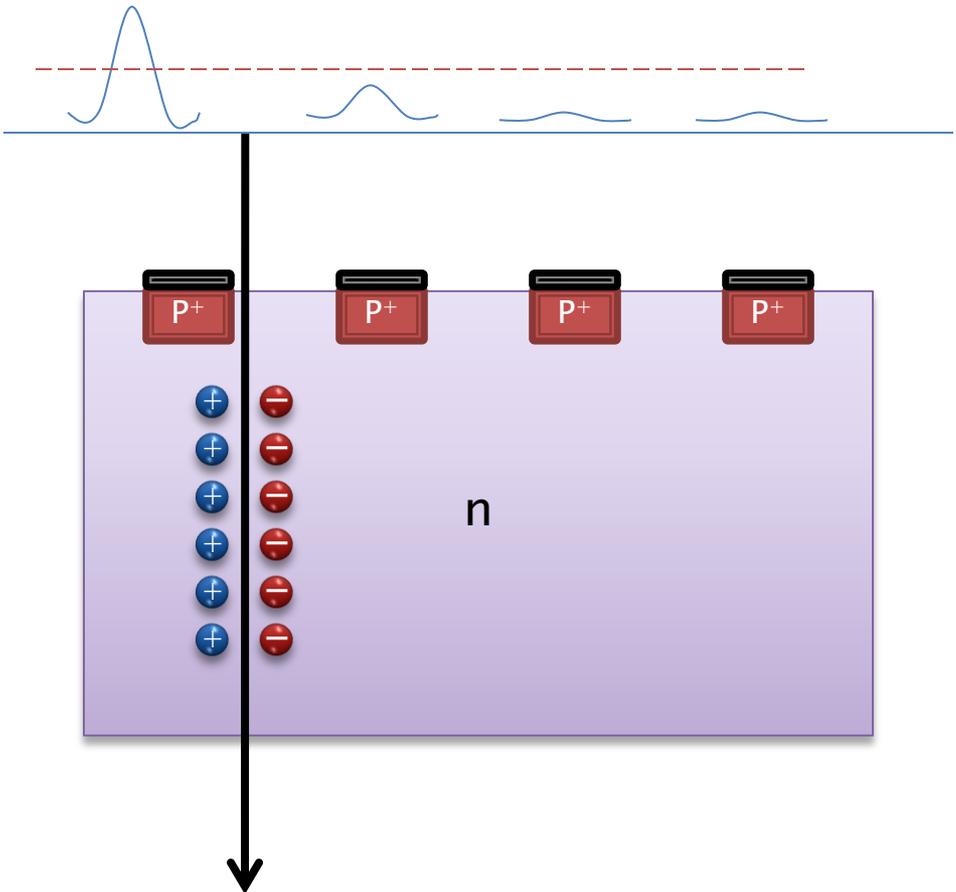
p: passo  
x: posizione della traccia

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{p/2} x^2 dx = \frac{p^2}{12}$$

(se  $p = 50\mu\text{m} \rightarrow \sigma = 14\mu\text{m}$ )

# Risoluzione spaziale: lettura analogica

Soglia  
output



Lettura analogica  
(baricentratura)

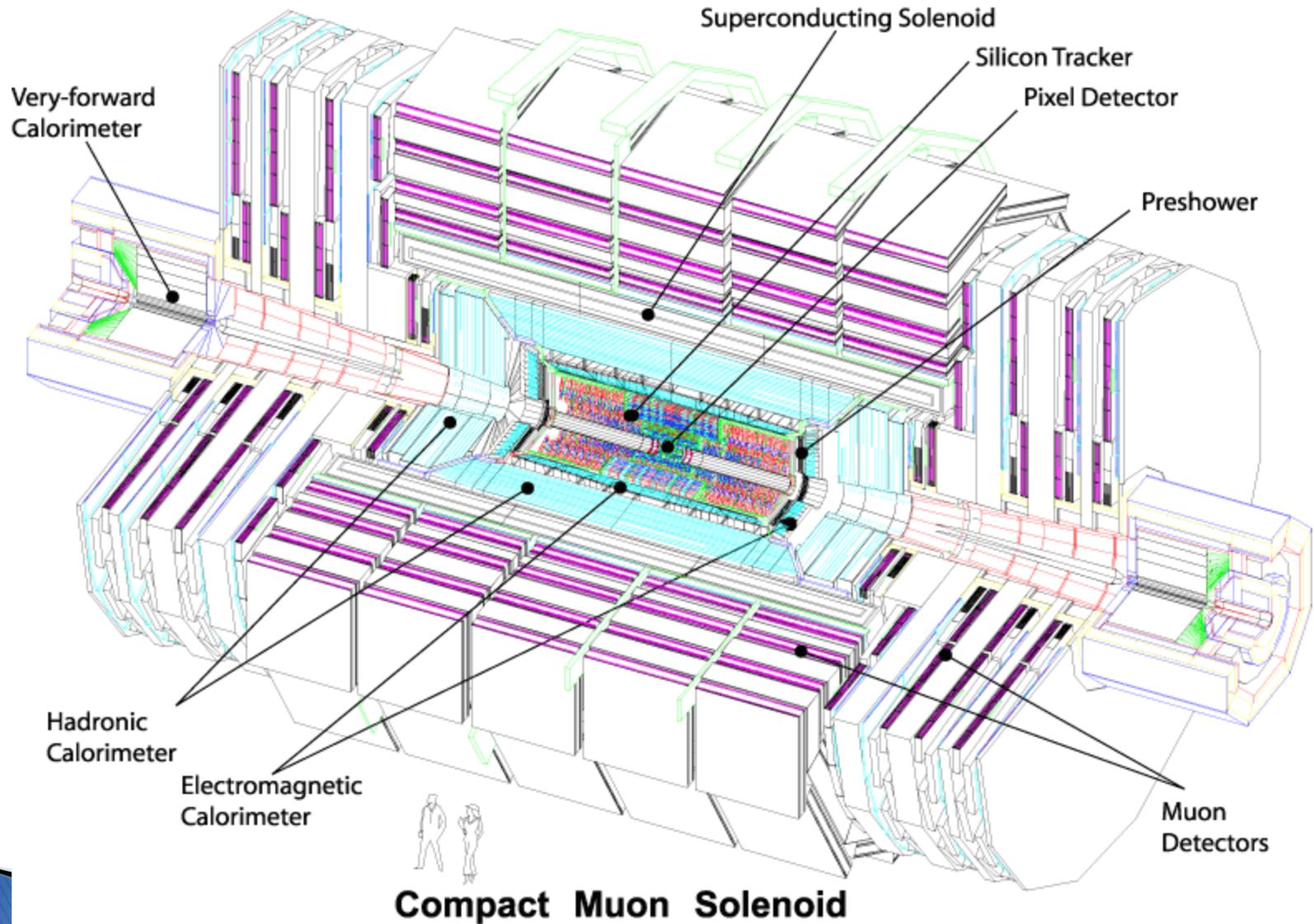
Posizione: 
$$x = \frac{h_1 x_1 + h_2 x_2}{h_1 + h_2}$$

Risoluzione: 
$$\sigma_x \approx \frac{p}{SNR}$$

- p: passo
- $x_1, x_2$ : posizione delle strip
- $h_1, h_2$ : segnale sulle 2 strip
- SNR: rapporto segnale rumore

Risoluzione: < 10 $\mu$ m

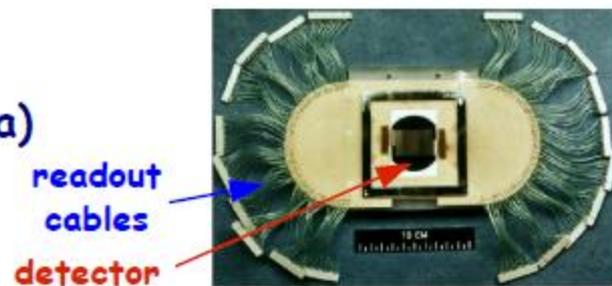
# Microstrip: applicazioni ad un collider



# Rivelatori a strip: un po' di storia

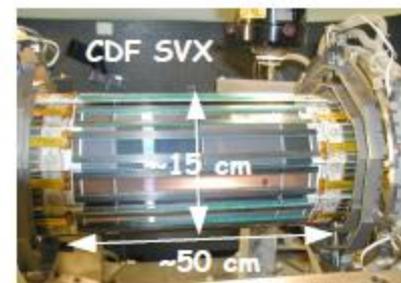
## 1981: NA11 experiment at CERN

- 24x36 mm<sup>2</sup> active surface (= FX digital camera)
- 1000 readout channels
- 1 m<sup>2</sup> of readout electronics (!)



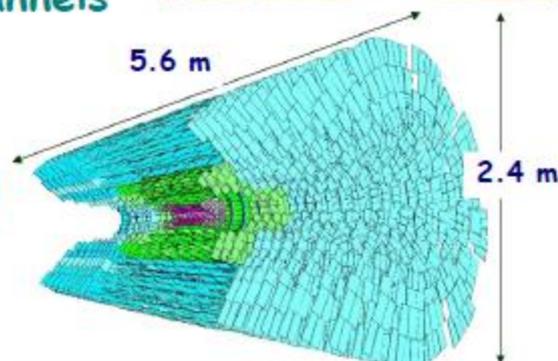
## Since ~1990: silicon vertex detector systems

- cover small volume around interaction region
  - highest particle density, best resolution required
- typically <1 m<sup>2</sup> active surface, 100 k readout channels



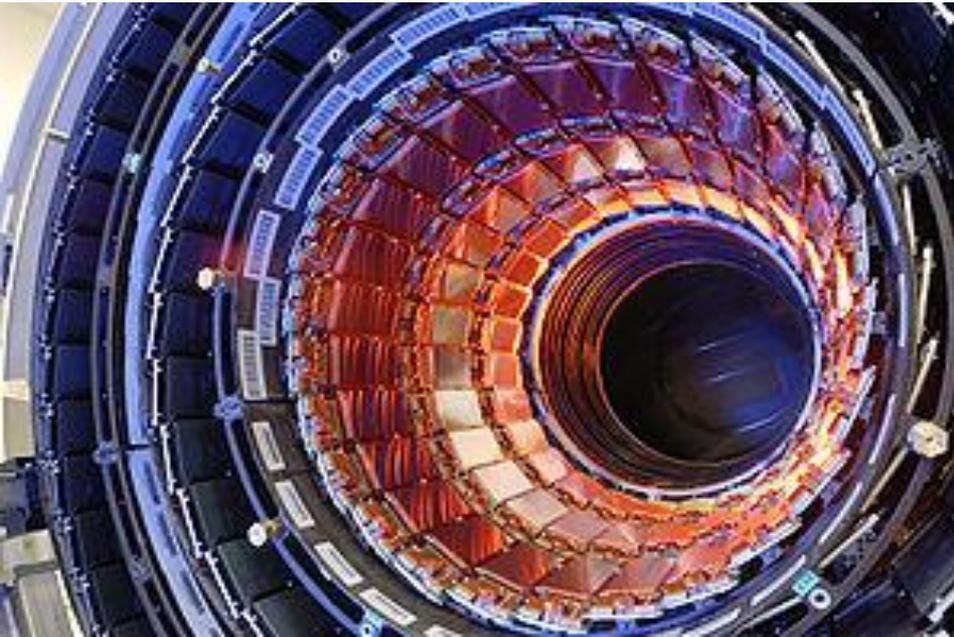
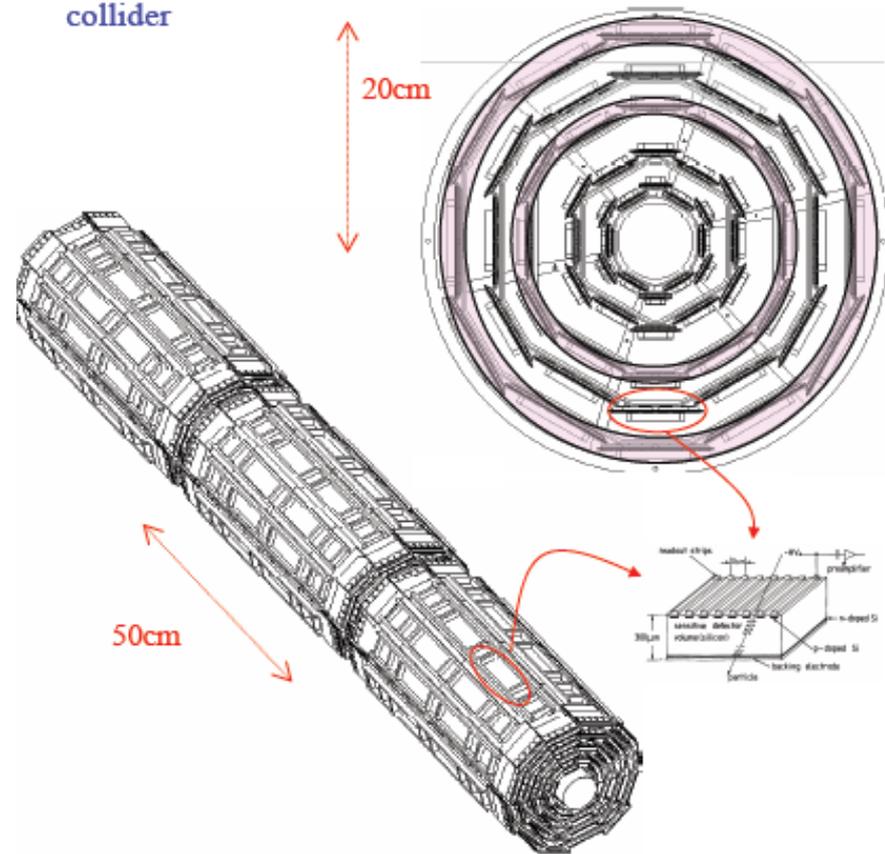
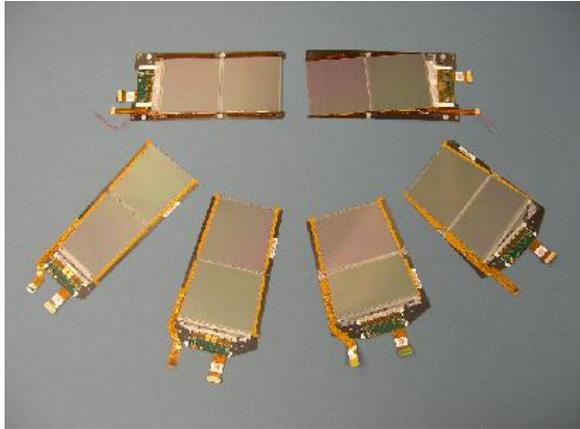
## LHC: large-surface tracking detectors

- significant cost reduction (electronics & detectors)
- higher particle densities, radiation load
- CMS silicon tracker: 200 m<sup>2</sup>, 60 million channels

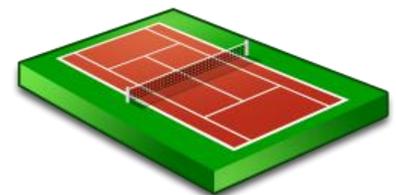


# Silicon tracker di CMS

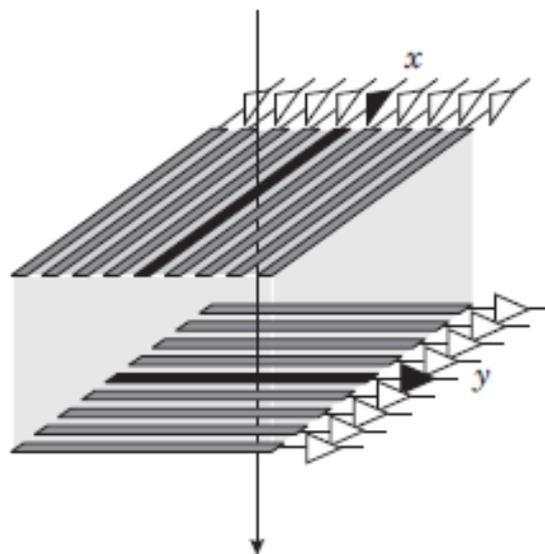
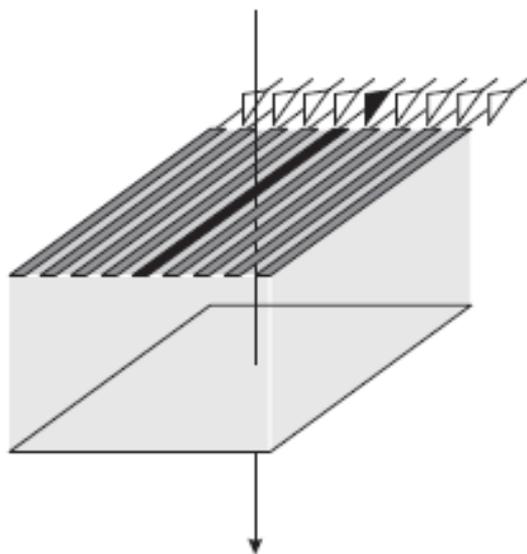
- i rivelatori di posizione: un esempio di applicazione ad un collider



- ~ 24000 moduli
- > 300m<sup>2</sup> di silicio

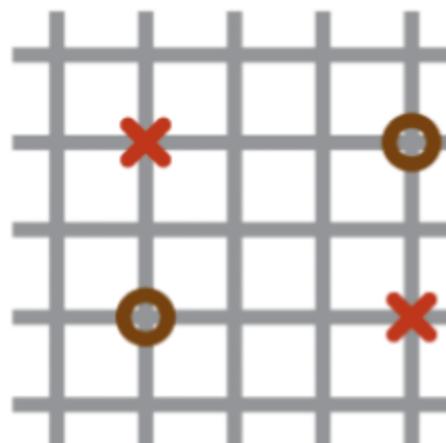


# Double-side microstrip



- Suddividendo un elettrodo in tante strip si ottengono informazioni unidimensionali;
- Suddividendo entrambi gli elettrodi per formare delle strip fra loro ortogonali, si può ottenere un'informazione bidimensionale
- si raccolgono sia elettroni che lacune
- minor materiale a parità di informazioni

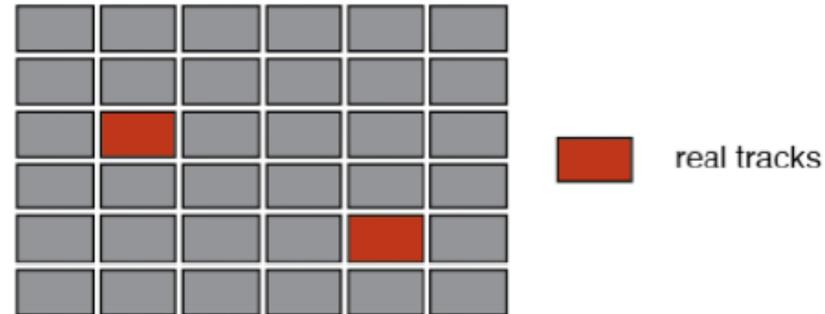
- Maggior complessità tecnica
- maggior costo
- Se ho più di una traccia, la misura di posizione è ambigua: compaiono degli hit fantasma (ghost-hit)!



# Rivelatori a pixel ibridi: pro e contro

In caso di più tracce, un rivelatore a pixel produce degli hit che non sono ambigui!

- In un rivelatore a pixel ibrido, **rivelatore e chip di lettura** sono due oggetti fisicamente distinti e sono posizionati uno sopra l'altro. I **bump-bond** formano la connessione elettrica fra ciascun pixel e la sua elettronica

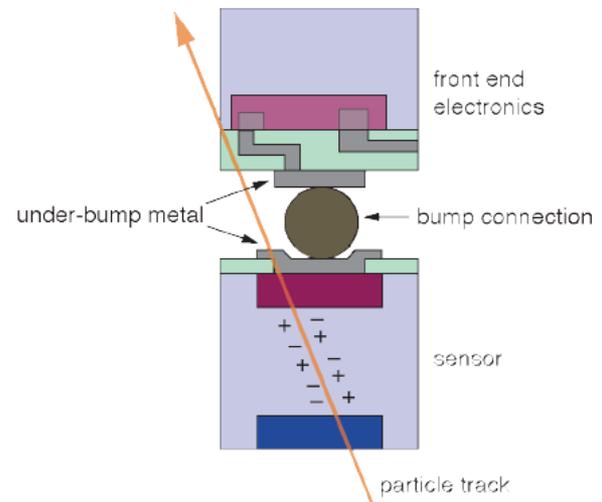


- **Dimensione** tipica: 50umx50um
- **Risoluzione** dipende dal tipo di lettura (14um se binaria, se analogica dipende dal SNR)
- Area piccola → capacità piccola ( $\approx 1-10$  fF/pixel) → **grande rapporto segnale rumore**
- Volume piccolo → **bassa corrente di buio** ( $\approx 1$  pA/pixel)
- elevato numero di **canali** da leggere
- elevato numero di **connessioni elettriche**
- Grande **dissipazione di potenza**



Il bump-bonding è un limite per questi oggetti:

- è un processo costoso
- limita la dimensione del pixel
- introduce problemi di material budget (multiple scattering)



# Rivelatori a pixel monolitici

- ▶ Abbiamo visto i rivelatori a pixel ibridi (sensore e readout separati):
- ▶ Il sensore è in Silicio, l'elettronica CMOS anche: **perché non integrare sullo stesso wafer sia il rivelatore che il suo circuito elettronico di lettura?**
- ▶ In generale questo non è fattibile perché i requisiti per il Silicio per fare un buon rivelatore e il silicio per fare una buona elettronica vanno in direzioni opposte:

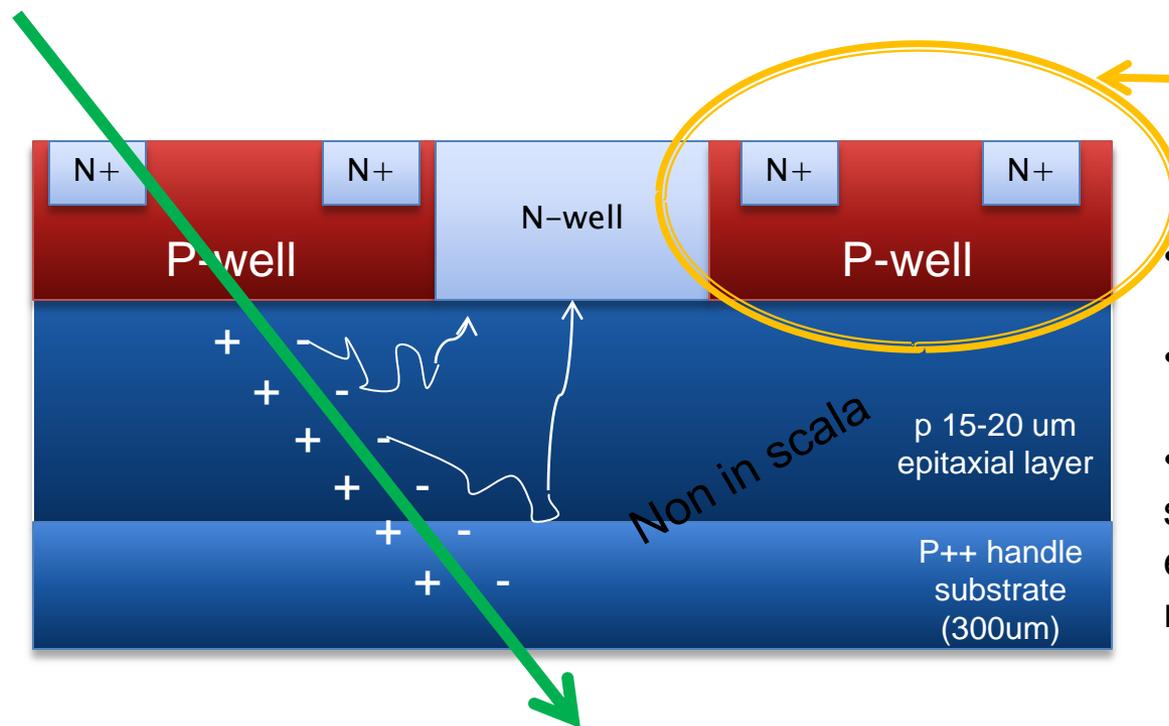
**Rivelatore** ⇒ segnale grande e campo elettrico ⇒ Giunzioni larghe ⇒ **Silicio alto resistivo** (basso drogaggio)

$$W \approx \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_R\mu\rho V} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_R V}{eN}}$$

**Elettronica** ⇒ Grossa integrazione (tanti transistor in poco spazio) ⇒ Giunzioni piccole ⇒ **Silicio basso resistivo** (alto drogaggio)

- ▶ Inoltre voglio tenere i costi bassi e sfruttare possibilmente dei processi commerciali già esistenti

# Rivelatori a pixel monolitici: MAPS CMOS



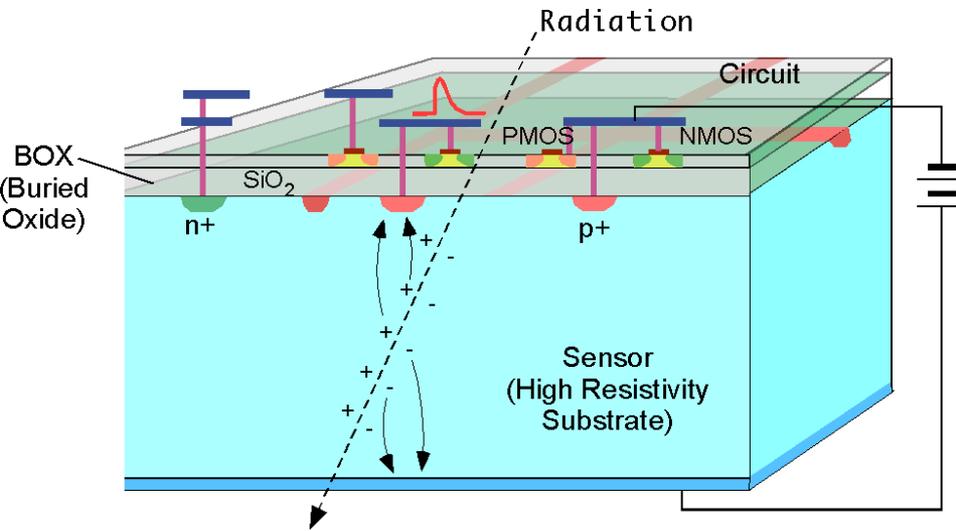
Transistor NMOS

- processo commerciale 😊
- design relativamente semplice
- la carica generata in uno strato di 15-20um di Silicio epitassiale (elettroni) viene raccolta da un elettrodo N

- Questo strato di silicio epitassiale non è alto resistivo → lo strato da cui si raccoglie la carica non è svuotato e la **carica viene raccolta per diffusione**
- Tempo di raccolta:  $\approx 100\text{ns}$  (sono **dispositivi relativamente lenti**)
- **Più sensibili al danno da radiazione** (danneggiamento sul reticolo)



# Rivelatori a pixel monolitici: MAPS SOI

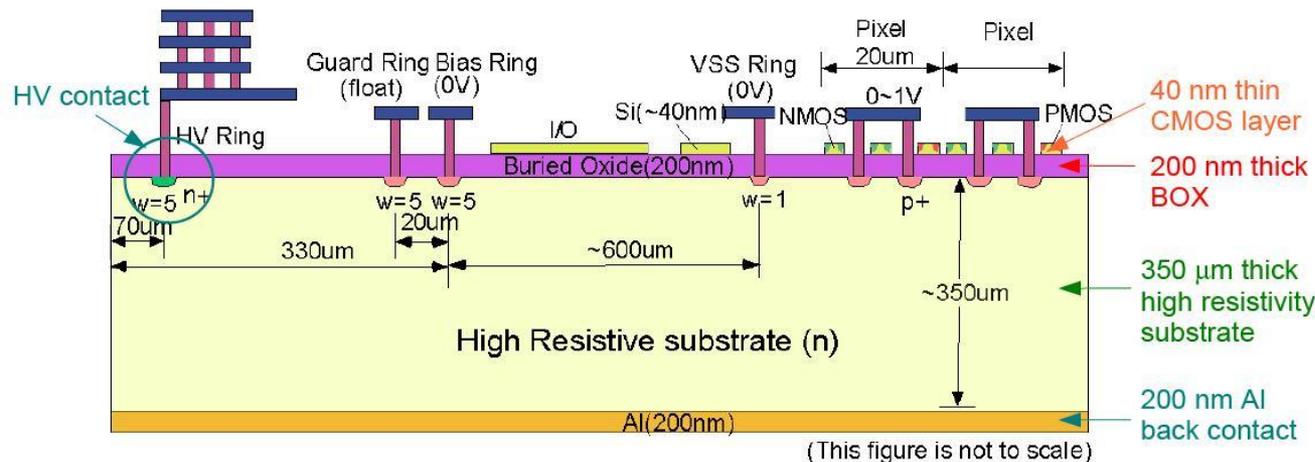


- Tecnologia **Silicon On Insulator (SOI)**: processo commerciale in cui l'elettronica viene realizzata in uno strato sottile (40nm), separato dall'handle wafer (300um, solo funzione di supporto) da uno strato di ossido (200nm).

- Elettronica e substrato sono quindi separati elettricamente.



- Se si possono creare dei fori attraverso l'ossido, realizzare degli impianti P+ e scegliere un substrato alto resistivo, allora si può applicare una tensione e si può avere un dispositivo svuotato (**raccolta per deriva**)!

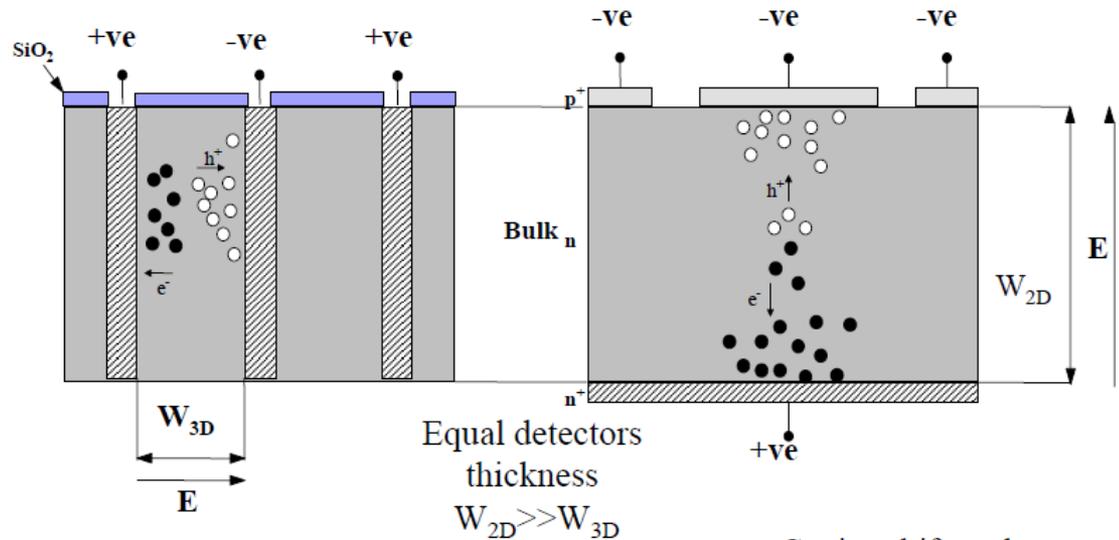
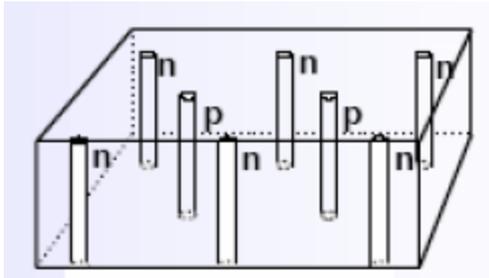


- **Accoppiamento fra elettronica e substrato**: la tensione applicata al substrato per svuotarlo può influenzare il comportamento dei transistor



- Sensibile al **danno indotto dalla radiazione ionizzante sugli ossidi**

# Rivelatori 3D



## ❑ Elettrodi:

- sono costituiti da colonne scavate attraverso il rivelatore: "3D"
- Diametro:  $\approx 10\mu m$ , distanza 50-100 $\mu m$

## ❑ Svuotamento laterale:

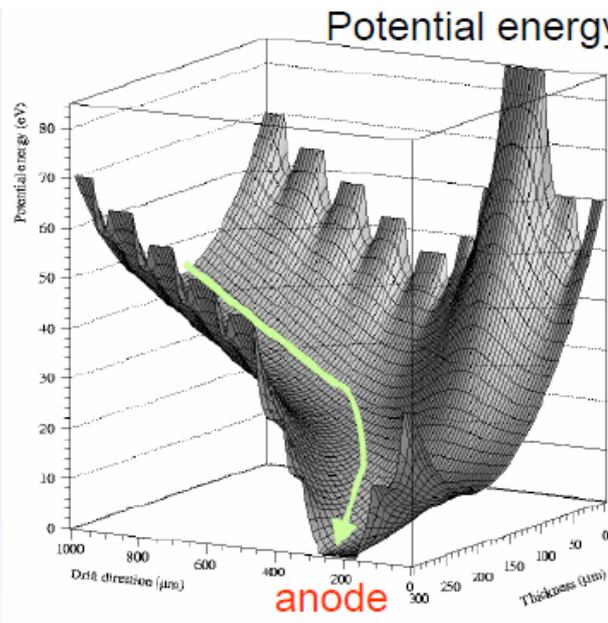
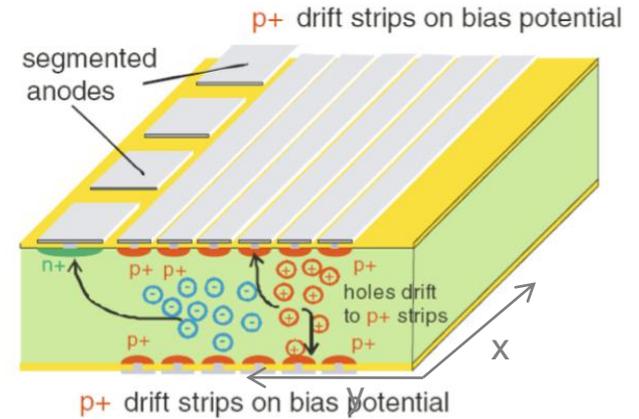
- Hanno bisogno di una tensione di svuotamento più bassa ( $V_{dep} \sim d^2$ )
- sono più resistenti alle radiazioni ( è possibile fare rivelatori più spessi)
- segnale veloce ( $\approx 3.5$  ns misurato)

## ❑ Fabbricazione dei rivelatori:

- il processo di fabbricazione è complesso : occorre "scavare" i fori e riempirli per creare gli elettrodi (DRIE etching, laser drilling, Photo Electro Chemical etching )
- aspect ratio attuale (rapporto fra profondità dei fori e diametro: 30:1)

# Silicon drift detector

- Un rivelatore a drift è segmentato su entrambi i lati (strip p+)
- Un lato del rivelatore è segmentato (n+ strip)
- Svuotamento completo
- Le lacune vengono raccolte dalle strip p+
- gli elettroni derivano verso gli anodi n+ parallelamente alla superficie;
- Una coordinata (x) viene determinata dal segnale sull'anodo (baricentro), l'altra (y) dal tempo impiegato dagli elettroni a raggiungere l'anodo



- anodo piccolo → basso noise
- buona risoluzione spaziale e in energia



- sono rivelatori lenti ( $t_{\text{drift}} \sim \mu\text{s}$ )
- occorre un'ottima stabilità in temperatura (velocità deve essere tenuta ben sotto controllo)
- bassa resistenza alle radiazioni

# Fotodiodi

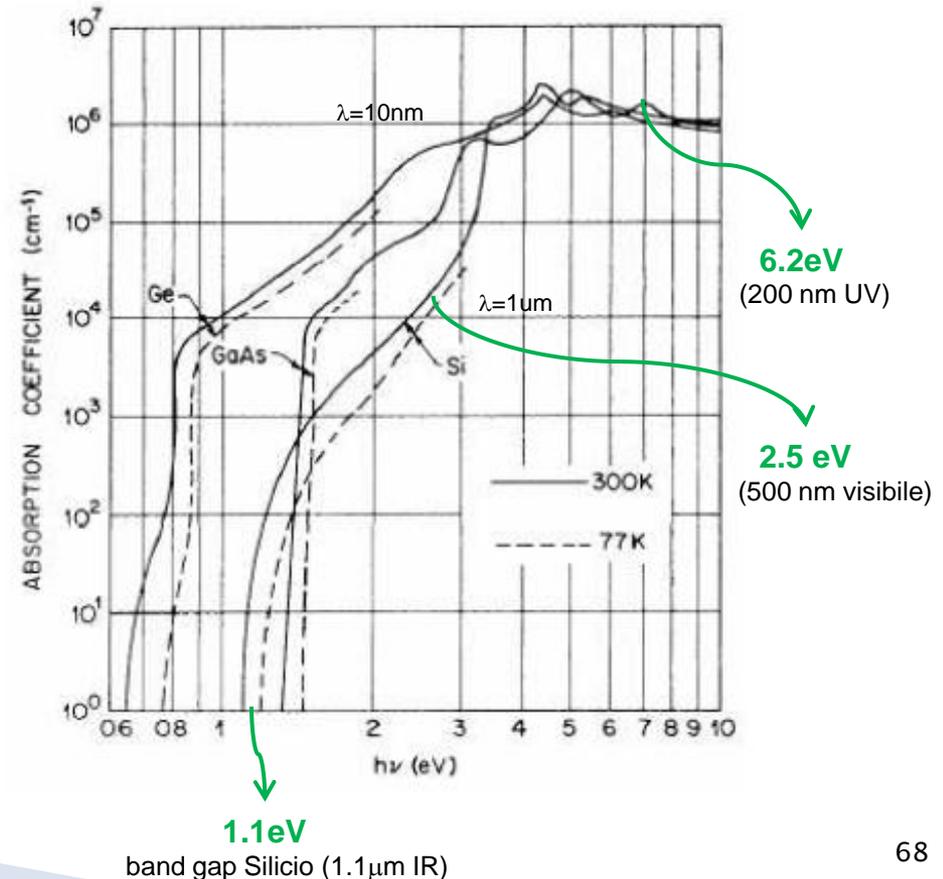
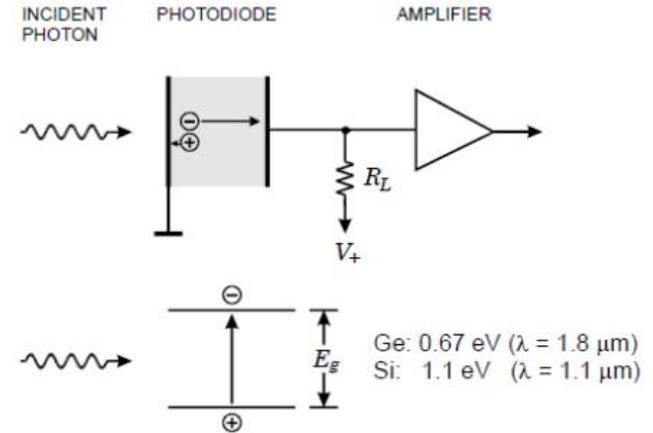
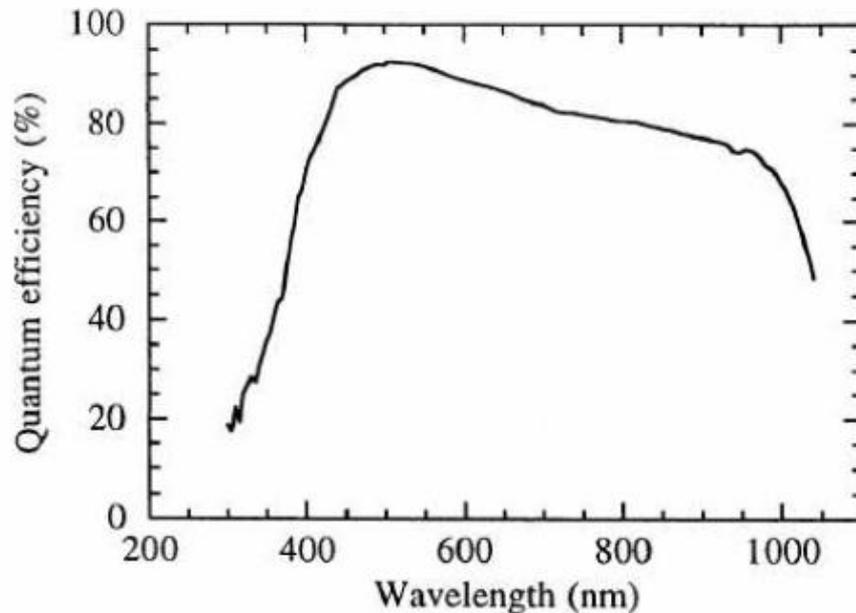
Tutti i semiconduttori sono sensibili alla luce.

Per avere un'efficienza quantica alta, occorre che i rivelatori siano disegnati per evitare strati "morti" sulla superficie, dal momento che la maggior parte dei fotoni (nel visibile) vengono assorbiti entro 1  $\mu\text{m}$  dalla superficie

$$N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu x} = N(0) \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

Dove  $\mu$  è detto **coefficiente di assorbimento** ( $\mu = 1/\lambda$  con  $\lambda$  **lunghezza di assorbimento**),  $\lambda$  è la distanza dalla superficie alla quale il 66% dei fotoni ha convertito:

$$N(\lambda) = N(0) \cdot e^{-1}$$



# Geiger Mode Avalanche photodiode

Nell'intervallo della luce visibile ogni fotone genera una sola coppia e-h



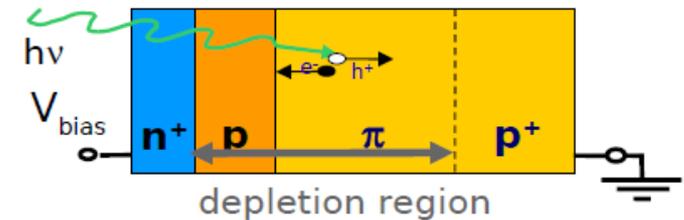
Il segnale generato in un fotodiode è basso. Esiste la possibilità di realizzare dei fotodiodi con guadagno interno?



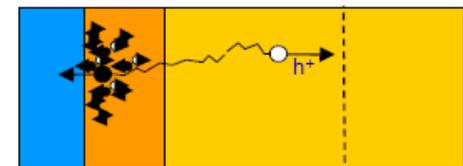
Sì, basta usare un **fotodiode a valanga!**

- ❑ un fotone penetra nel dispositivo e genera una coppia e-h
- ❑ l'elettrone si muove sotto l'azione del campo elettrico.
- ❑ se, durante il moto di drift, attraversa una zona con campo elettrico sufficientemente elevato, può accelerare ed acquisire un'energia sufficiente a ionizzare ( $V_{bias} > V_{breakdown}$ ).
- ❑ l'elettrone generato per ionizzazione viene a sua volta accelerato e può acquisire un'energia tale da ionizzare a sua volta
- ❑ si dà origine così ad un **processo di ionizzazione a valanga**
- ❑ **guadagno**:  $\sim 10^6$
- ❑ se la corrente e la durata della valanga sono limitati, il diodo non si danneggia.

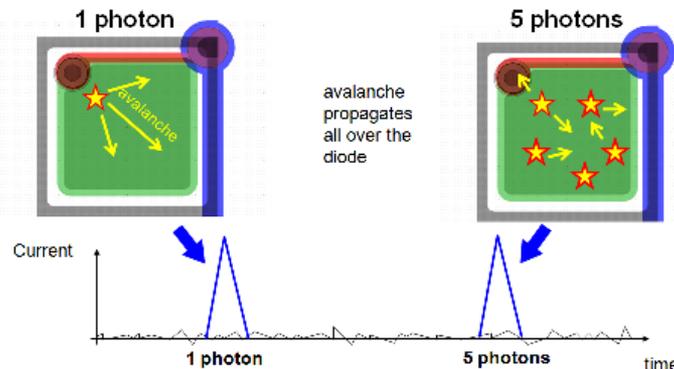
- $t=0$ : carrier initiates the avalanche



- $0 < t < t_1$ : avalanche spreading



←→ Regione di moltiplicazione a valanga      ←→ Regione a basso campo elettrico



- ❑ Per ogni fotone incidente c'è un impulso di corrente di ampiezza uniforme

- ❑ Se più di un fotone incide sul dispositivo, perdo ogni informazione relativa all'intensità (no informazione analogica)



# Geiger Mode Avalanche photodiode

Nell'intervallo della luce visibile ogni fotone genera una sola coppia e-h



Il segnale generato in un fotodiodo è basso. Esiste la possibilità di realizzare dei fotodiodi con guadagno interno?

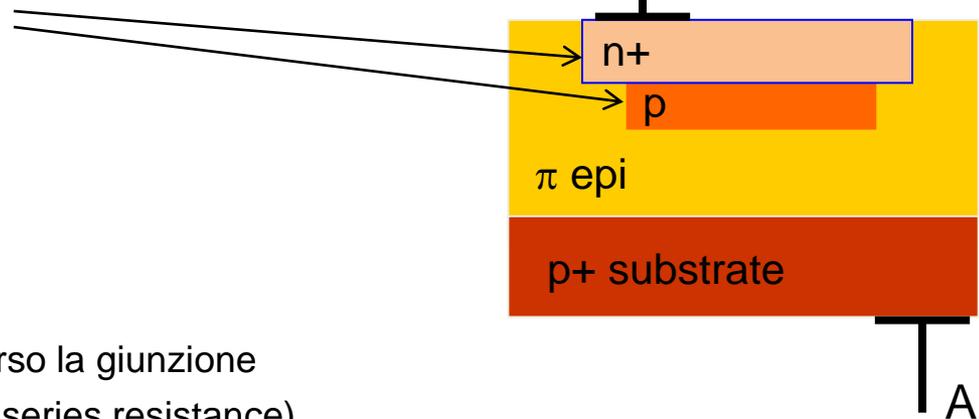


Sì, basta usare un **fotodiodo a valanga!**

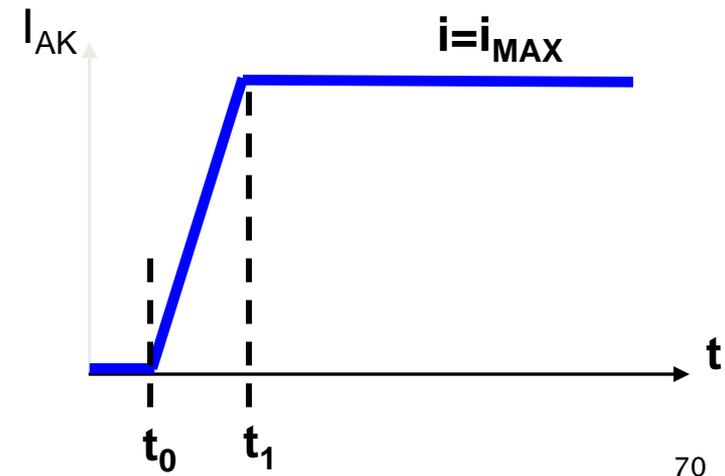
▶ Giunzione P/n polarizzata oltre il breakdown

- $V_{BD}$ : determinata dal profilo degli impianti
- High-field region across junction
- $V_{OV}$ : bias beyond  $V_{BD}$

- ✓  $t = 0$ : Bias a  $V_{BD} + V_{OV}$
- ✓  $t < t_0$ : Nessun fotone, nessun segnale
- ✓  $t = t_0$ : Fotoni! → inizia la valanga
- ✓  $t_0 < t < t_1$ : La valanga si diffonde attraverso la giunzione
- ✓  $t > t_1$ : la valanga si sostiene (limited by series resistance)



PER RIVELARE UN ALTRO FOTONE OCCORRE SPEGNERE LA VALANGA!  
(meccanismo di quenching)



# Geiger Mode Avalanche photodiode

Nell'intervallo della luce visibile ogni fotone genera una sola coppia e-h



Il segnale generato in un fotodiodo è basso. Esiste la possibilità di realizzare dei fotodiodi con guadagno interno?

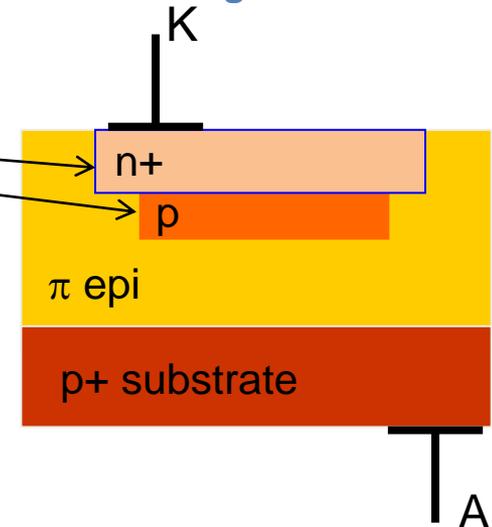


Sì, basta usare un **fotodiodo a valanga!**

▶ Giunzione P/n polarizzata oltre il breakdown

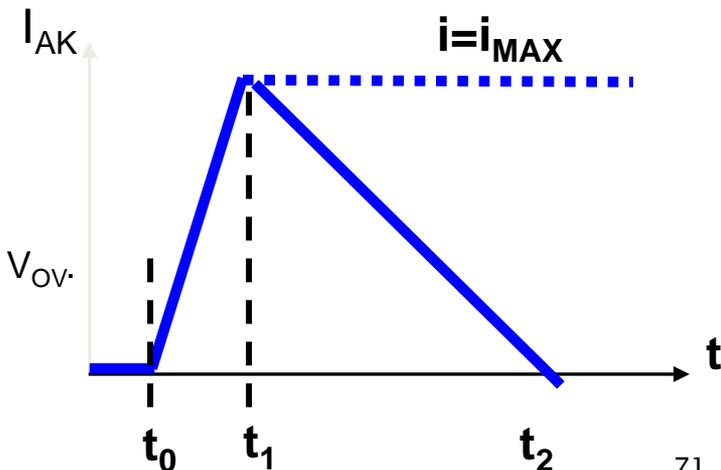
- $V_{BD}$ : determinata dal profilo degli impianti
- High-field region across junction
- $V_{OV}$ : bias beyond  $V_{BD}$

- ✓  $t = 0$ : Bias a  $V_{BD} + V_{OV}$
- ✓  $t < t_0$ : Nessun fotone, nessun segnale
- ✓  $t = t_0$ : Fotoni! → inizia la valanga
- ✓  $t_0 < t < t_1$ : La valanga si diffonde attraverso la giunzione
- ✓  $t > t_1$ : la valanga si sostiene (limited by series resistance)



PER RIVELARE UN ALTRO FOTONE  
OCORRE SPEGNERE LA VALANGA!  
(meccanismo di quenching)

- ✓  $t > t_2$ : la valanga è stata spenta, il bias riportato a  $V_{BD} + V_{OV}$ .
- ✓ UN ALTRO FOTONE PUO' ESSERE RIVELATO!



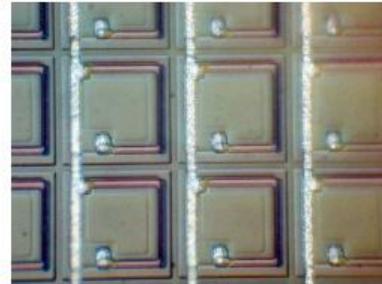
# Silicon Photomultiplier

Un Silicon Photomultiplier è un rivelatore costituito da una matrice di fotodiodi a valanga in Geiger Mode collegati fra loro in parallelo

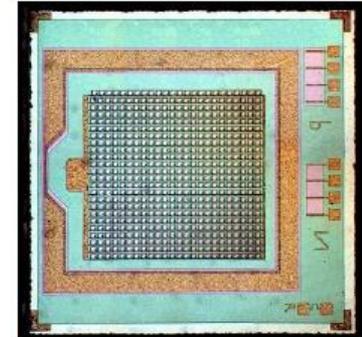


In uscita ho un segnale dato dalla somma dei segnali sui singoli elementi

- ❑ Sensibilità al singolo fotone
- ❑ Risposta veloce ( $<1$  ns)
- ❑ il range dinamico dipende dal numero di pixel
- ❑ per segnali molto grandi si ha una saturazione
- ❑ ogni elettrone generato può dare origine alla valanga, anche quelli generati termicamente → non ho la possibilità di distinguere la valanga prodotta da questi elettroni (noise) da quelli generati da un fotone incidente (segnale): dark rate molto elevato ( $10\text{MHz}/\text{cm}^2$ )



Pixel size:  
 $\sim 25 \times 25 \mu\text{m}^2$  to  $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$



Array size:  
 $0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$  to  $5 \times 5 \text{mm}^2$

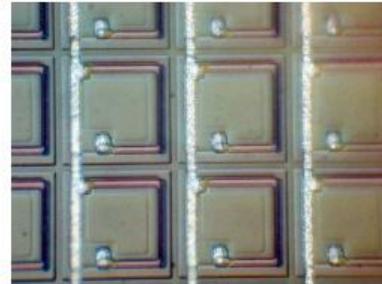
# Silicon Photomultiplier

Un Silicon Photomultiplier è un rivelatore costituito da una matrice di fotodiodi a valanga in Geiger Mode collegati fra loro in parallelo

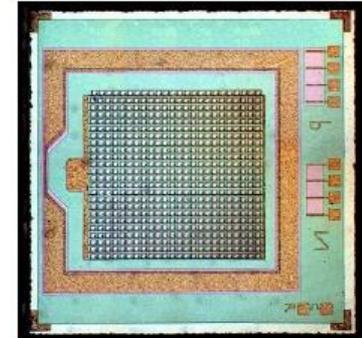


In uscita ho un segnale dato dalla somma dei segnali sui singoli elementi

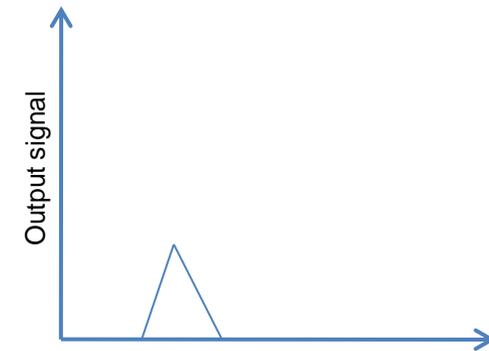
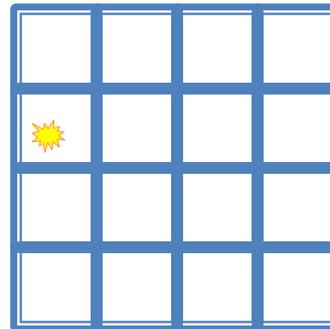
- ❑ Sensibilità al singolo fotone
- ❑ Risposta veloce ( $<1$  ns)
- ❑ il range dinamico dipende dal numero di pixel
- ❑ per segnali molto grandi si ha una saturazione
- ❑ ogni elettrone generato può dare origine alla valanga, anche quelli generati termicamente  $\rightarrow$  non ho la possibilità di distinguere la valanga prodotta da questi elettroni (noise) da quelli generati da un fotone incidente (segnale): dark rate molto elevato ( $10\text{MHz}/\text{cm}^2$ )



Pixel size:  
 $\sim 25 \times 25 \mu\text{m}^2$  to  $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$



Array size:  
 $0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$  to  $5 \times 5 \text{mm}^2$



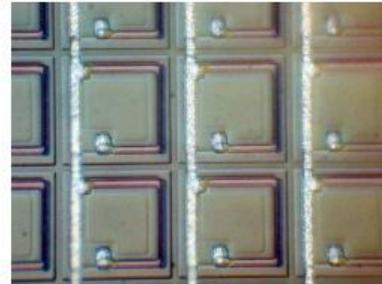
# Silicon Photomultiplier

Un Silicon Photomultiplier è un rivelatore costituito da una matrice di fotodiodi a valanga in Geiger Mode collegati fra loro in parallelo

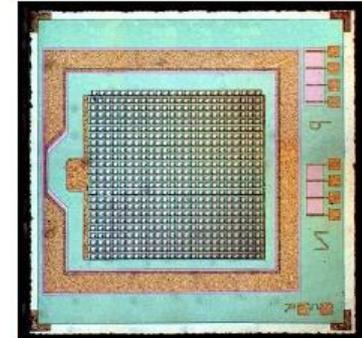


In uscita ho un segnale dato dalla somma dei segnali sui singoli elementi

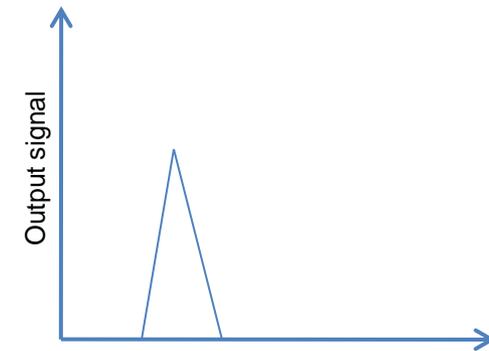
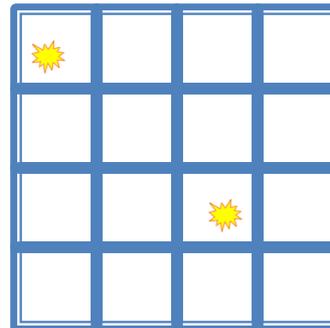
- ❑ Sensibilità al singolo fotone
- ❑ Risposta veloce (<1 ns)
- ❑ il range dinamico dipende dal numero di pixel
- ❑ per segnali molto grandi si ha una saturazione
- ❑ ogni elettrone generato può dare origine alla valanga, anche quelli generati termicamente → non ho la possibilità di distinguere la valanga prodotta da questi elettroni (noise) da quelli generati da un fotone incidente (segnale): dark rate molto elevato (10Mhz/cm<sup>2</sup>)



Pixel size:  
~25 x 25  $\mu\text{m}^2$  to ~100 x 100  $\mu\text{m}^2$



Array size:  
0.5 x 0.5 mm<sup>2</sup> to 5 x 5 mm<sup>2</sup>



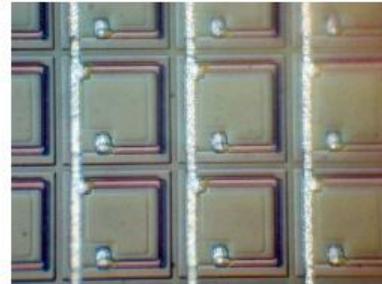
# Silicon Photomultiplier

Un Silicon Photomultiplier è un rivelatore costituito da una matrice di fotodiodi a valanga in Geiger Mode collegati fra loro in parallelo

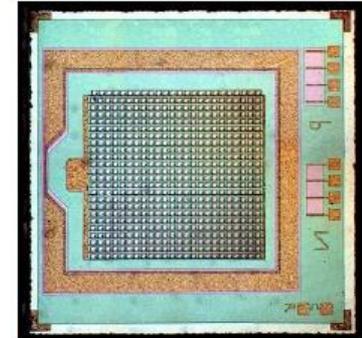


In uscita ho un segnale dato dalla somma dei segnali sui singoli elementi

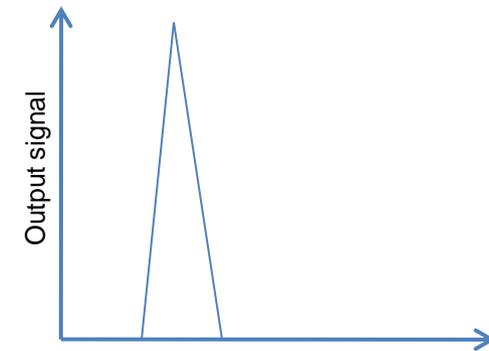
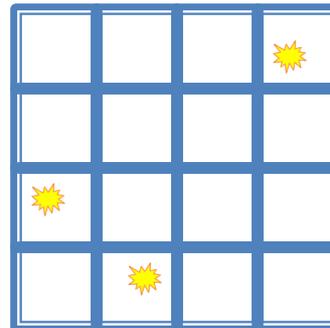
- ❑ Sensibilità al singolo fotone
- ❑ Risposta veloce (<1 ns)
- ❑ il range dinamico dipende dal numero di pixel
- ❑ per segnali molto grandi si ha una saturazione
- ❑ ogni elettrone generato può dare origine alla valanga, anche quelli generati termicamente → non ho la possibilità di distinguere la valanga prodotta da questi elettroni (noise) da quelli generati da un fotone incidente (segnale): dark rate molto elevato (10Mhz/cm<sup>2</sup>)



Pixel size:  
~25 x 25  $\mu\text{m}^2$  to ~100 x 100  $\mu\text{m}^2$



Array size:  
0.5 x 0.5 mm<sup>2</sup> to 5 x 5 mm<sup>2</sup>



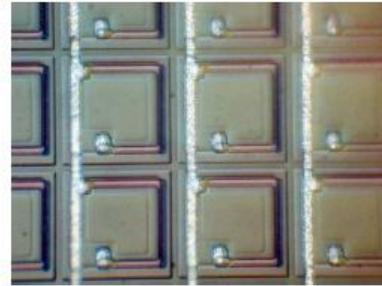
# Silicon Photomultiplier

Un Silicon Photomultiplier è un rivelatore costituito da una matrice di fotodiodi a valanga in Geiger Mode collegati fra loro in parallelo

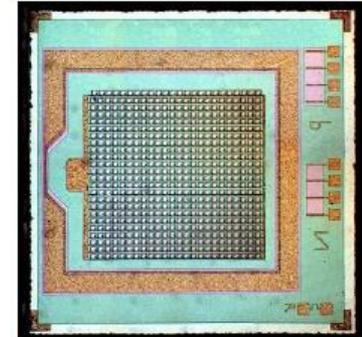


In uscita ho un segnale dato dalla somma dei segnali sui singoli elementi

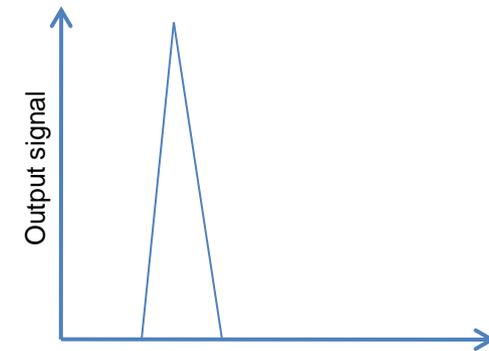
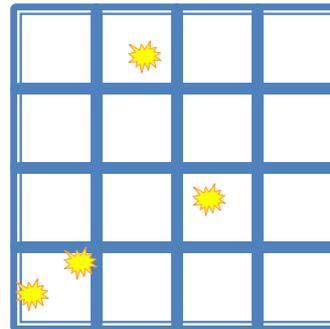
- ❑ Sensibilità al singolo fotone
- ❑ Risposta veloce (<1 ns)
- ❑ il range dinamico dipende dal numero di pixel
- ❑ per segnali molto grandi si ha una saturazione
- ❑ ogni elettrone generato può dare origine alla valanga, anche quelli generati termicamente → non ho la possibilità di distinguere la valanga prodotta da questi elettroni (noise) da quelli generati da un fotone incidente (segnale): dark rate molto elevato (10Mhz/cm<sup>2</sup>)



Pixel size:  
~25 x 25  $\mu\text{m}^2$  to ~100 x 100  $\mu\text{m}^2$



Array size:  
0.5 x 0.5 mm<sup>2</sup> to 5 x 5 mm<sup>2</sup>



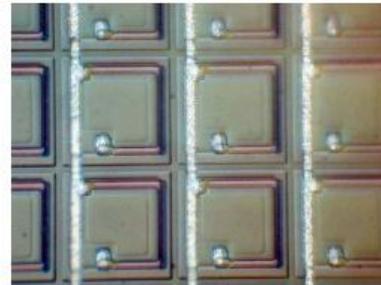
# Silicon Photomultiplier

Un Silicon Photomultiplier è un rivelatore costituito da una matrice di fotodiodi a valanga in Geiger Mode collegati fra loro in parallelo

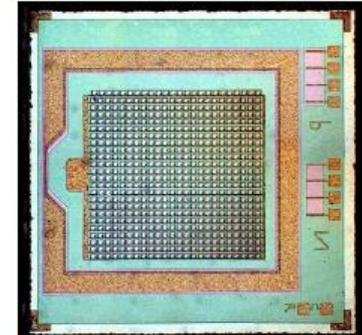


In uscita ho un segnale dato dalla somma dei segnali sui singoli elementi

- ❑ Sensibilità al singolo fotone
- ❑ Risposta veloce ( $<1$  ns)
- ❑ il range dinamico dipende dal numero di pixel
- ❑ per segnali molto grandi si ha una saturazione
- ❑ ogni elettrone generato può dare origine alla valanga, anche quelli generati termicamente  $\rightarrow$  non ho la possibilità di distinguere la valanga prodotta da questi elettroni (noise) da quelli generati da un fotone incidente (segnale): dark rate molto elevato ( $10\text{MHz}/\text{cm}^2$ )



Pixel size:  
 $\sim 25 \times 25 \mu\text{m}^2$  to  $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$



Array size:  
 $0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$  to  $5 \times 5 \text{mm}^2$

