

Misure e analisi dati SiPM

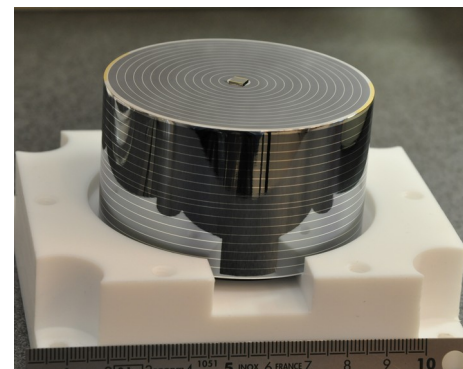
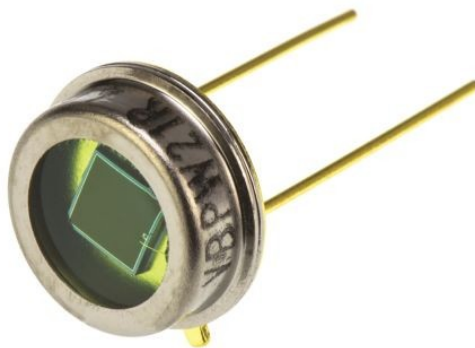
Contenuti

- Fotorivelatori
- Caratteristica IV di un diodo
- Fotodiodo a valanga
- SiPM
- Segnale di un SiPM
- SiPM per l'esperimento DUNE
- Setup per test di SiPM a freddo a Ferrara
- Misure curve IV
- Misure di DCR e correlated noise

Rivelatori per fotoni

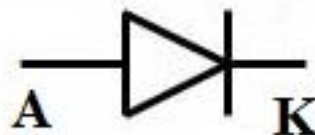
- I dati che vengono analizzati provengono da **segnali generati nei rivelatori**;
- a seconda del tipo di fenomeno fisico da rivelare, esistono **diverse tipologie** di detector;
- per i fotoni i rivelatori più comuni sono: tubi fotomoltiplicatori; **rivelatori a semiconduttore**, bolometri.

NB Fotone= quanto di luce

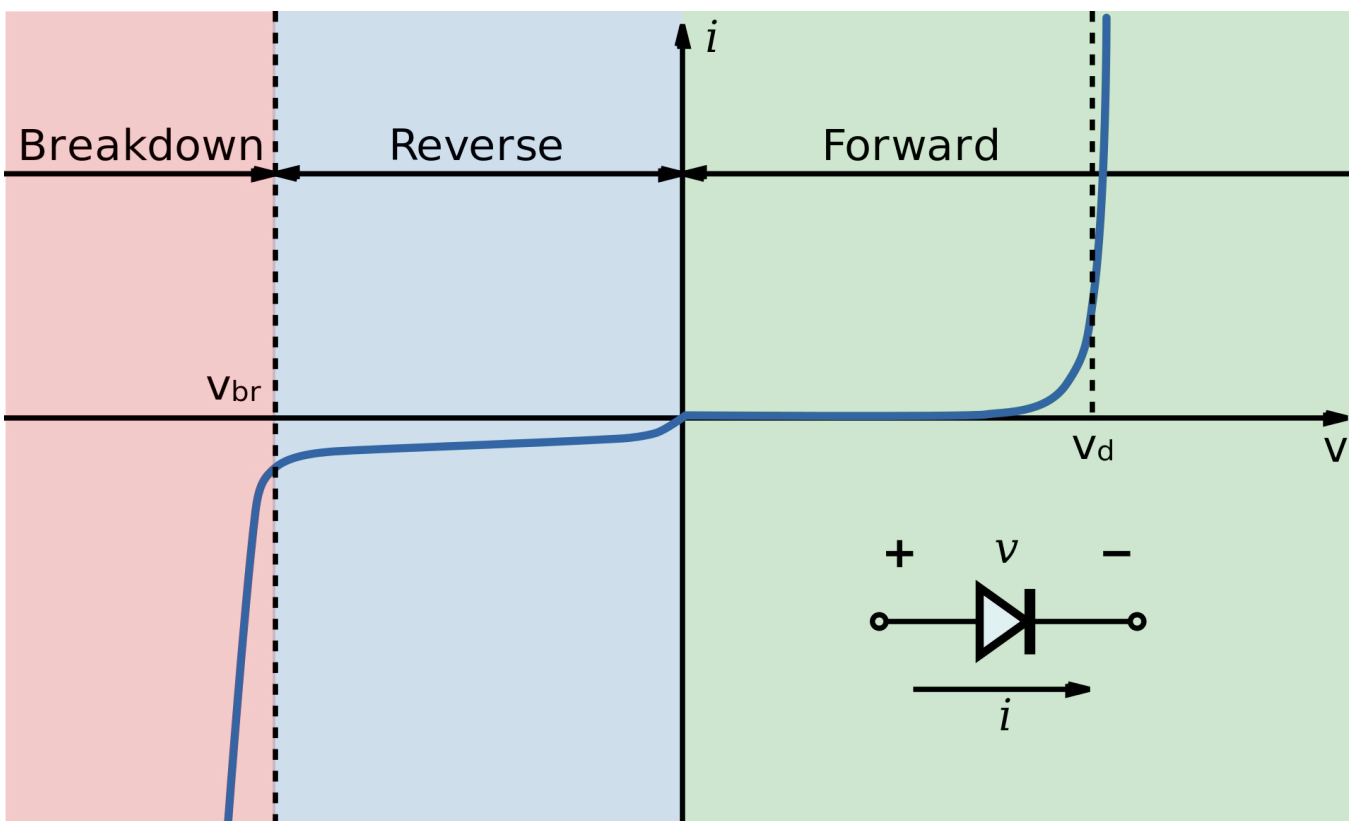


Diodo al silicio

- Componente elettronico, passivo, bipolare, non-lineare;
- giunzione tra semiconduttori drogati diversamente;
- effetto pratico: in un verso scorre corrente, nell'altro no
- un diodo può essere usato come emettitore di luce (LED) oppure come rivelatore di luce (PD).



Caratteristica tensione-corrente



La caratteristica IV rappresenta la curva in cui la corrente che fluisce attraverso il diodo è espressa in funzione della tensione applicata ai suoi capi.

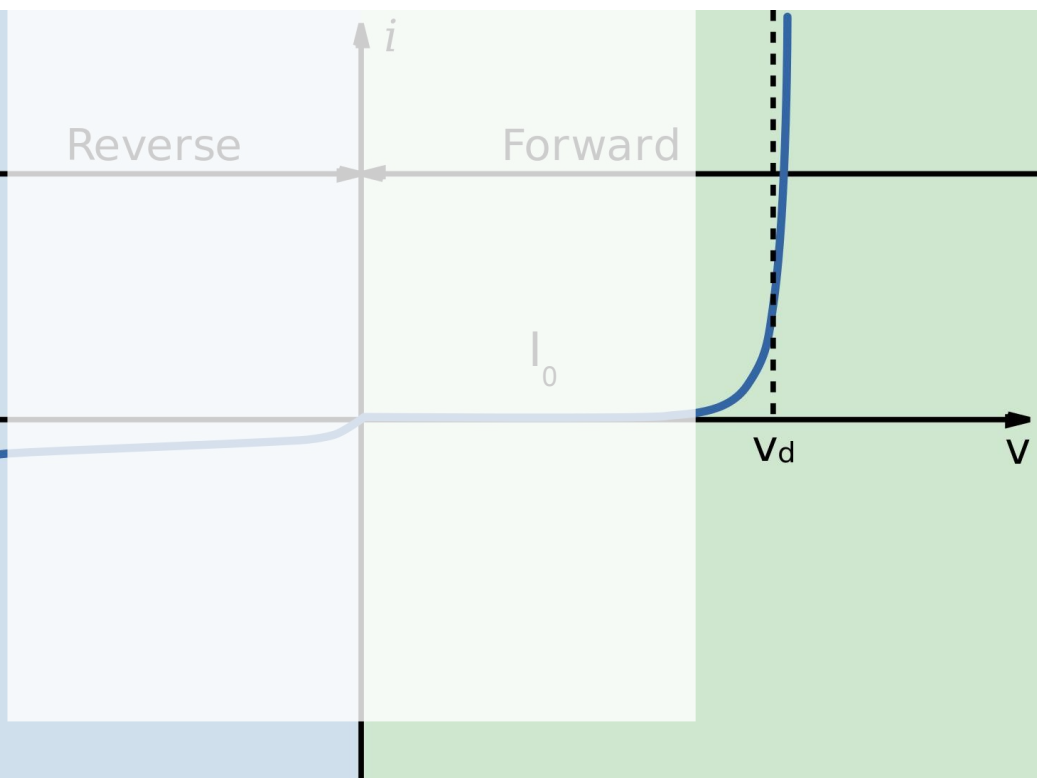
Per un **diodo ideale** (equazione del diodo ideale di Shockley):

$$i = I_0 \left(e^{\frac{v}{V_T}} - 1 \right);$$

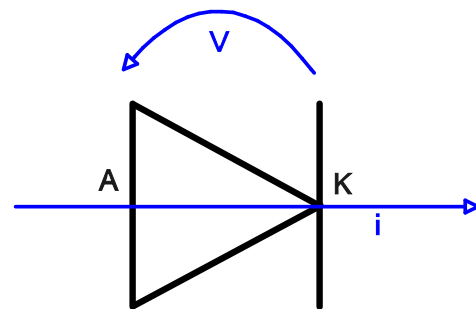
$$V_T = \frac{K_B T}{n q};$$

$$K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}; \quad q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C};$$

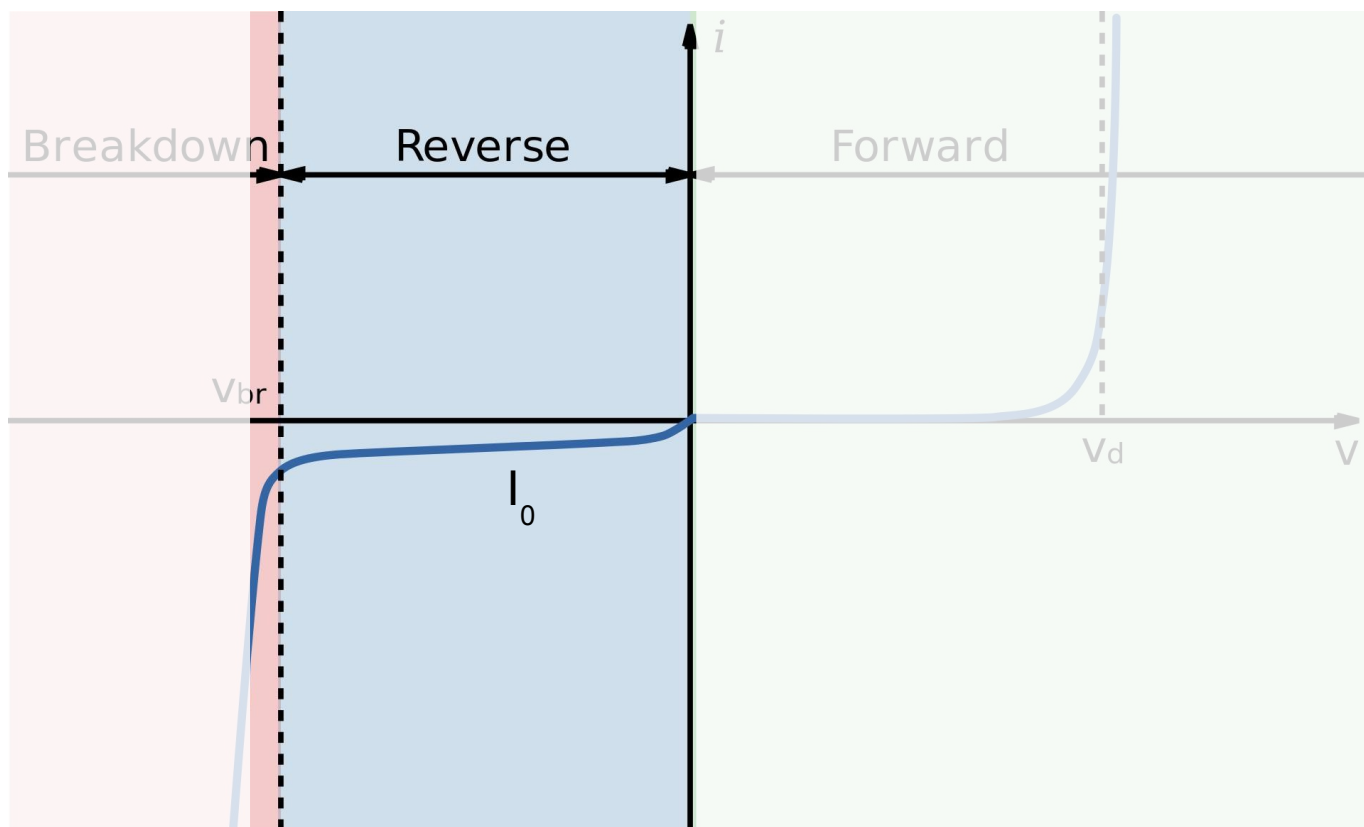
Polarizzazione diretta



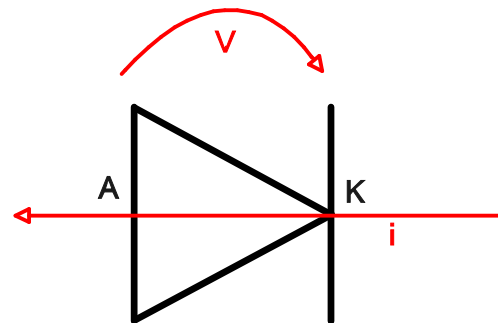
Per tensioni V positive, il diodo è polarizzato direttamente e la corrente diretta fluisce dall'anodo al catodo. Per valori di tensione compresi tra 0 e V_d , la corrente assume tuttavia valori trascurabili. Valori tipici per V_d sono di qualche centinaio di mV.



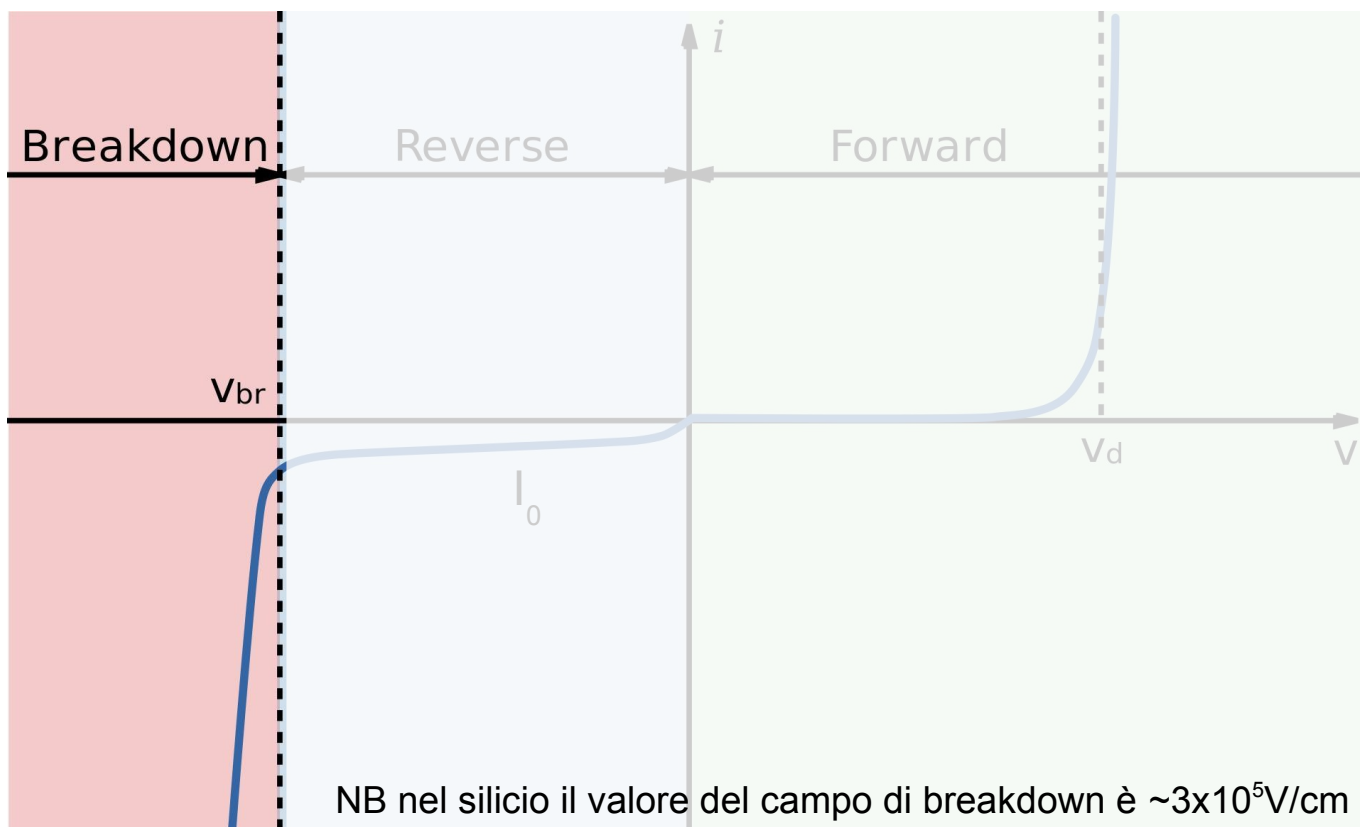
Polarizzazione inversa



Per tensioni V negative, il diodo si dice polarizzato inversamente. Per tensioni in valore assoluto fino a V_{br} si misura una corrente costante I_0 (generalmente piccola) che fluisce dal catodo all'anodo.



Polarizzazione inversa: valanga



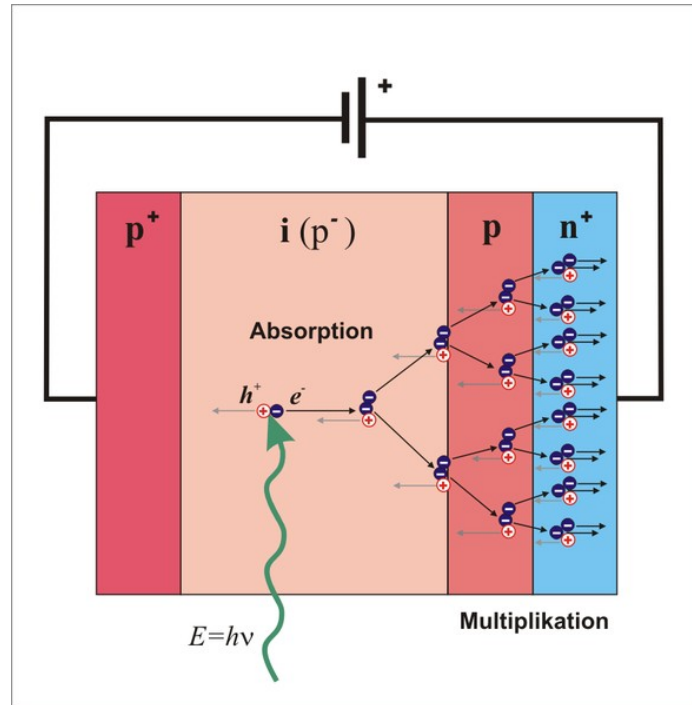
Per tensioni V negative, in modulo al di sopra della tensione V_{br} (solitamente piuttosto elevato), il diodo entra nella regione di **breakdown**.

In questa regione si verifica la “rottura” della giunzione, ossia il forte campo elettrico generato dalla tensione di polarizzazione applicata, fa sì che gli elettroni che fluiscono nella giunzione vengano accelerati al punto che gli urti successivi con gli atomi del materiale presente conducono alla formazione di altri elettroni liberi. Si innesca così un processo auto-sostenuto detto **valanga** in cui un singolo elettrone genera una corrente macroscopica.

Si può sfruttare questo effetto per ottenere una grande amplificazione!

APD

APD=Avalanche photodiode: sfrutta l'effetto valanga per rivelare il “singolo fotone”.



Il fotone (con energia $h\nu$) viene assorbito nella giunzione generando così una coppia elettrone-lacuna. L'elettrone così liberato viaggia verso la regione ad alto campo dove, sfruttando l'effetto valanga, **vengono liberati molti elettroni**.

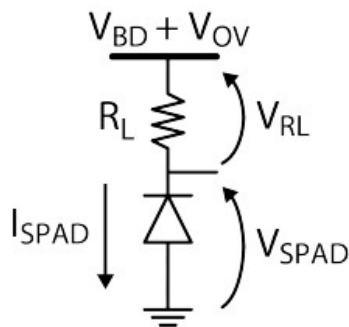
Questa carica viene raccolta dall'anodo dove abbiamo quindi un segnale macroscopico di (10^6 - 10^7) elettroni a fronte di un rilascio di energia molto piccolo (qualche eV)!

La resistenza di quenching

OK, molto bello, però c'è un **problema**.....

... come facciamo a **fermare la valanga** una volta che abbiamo ottenuto il segnale? (Il rivelatore non è sensibile al passaggio di altri fotoni durante la valanga!)

La soluzione (non l'unica) che si preferisce è utilizzare un componente passivo quale una **resistenza** (di quenching) posta in serie all'APD.



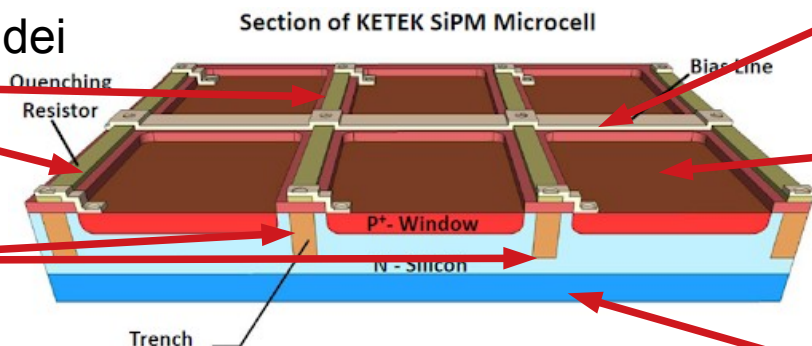
Durante la valanga, la corrente fluisce attraverso la resistenza di quenching R_L facendo sì che la tensione ai capi del diodo si riduca. Quando la tensione V_{SPAD} torna ad essere minore della tensione di breakdown, la valanga si smorza! L'APD torna quindi ad essere sensibile.

I SiPM

- SiPM = **silicon photomultiplier**;
- matrice di **avalanche photodiode** (APD);
- nel SiPM le dimensioni tipiche di ciascun APD sono dell'ordine di $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$;
- migliaia di APD accoppiati in parallelo.

Resistenze di quenching dei singoli APD

Trincee di separazione tra APD

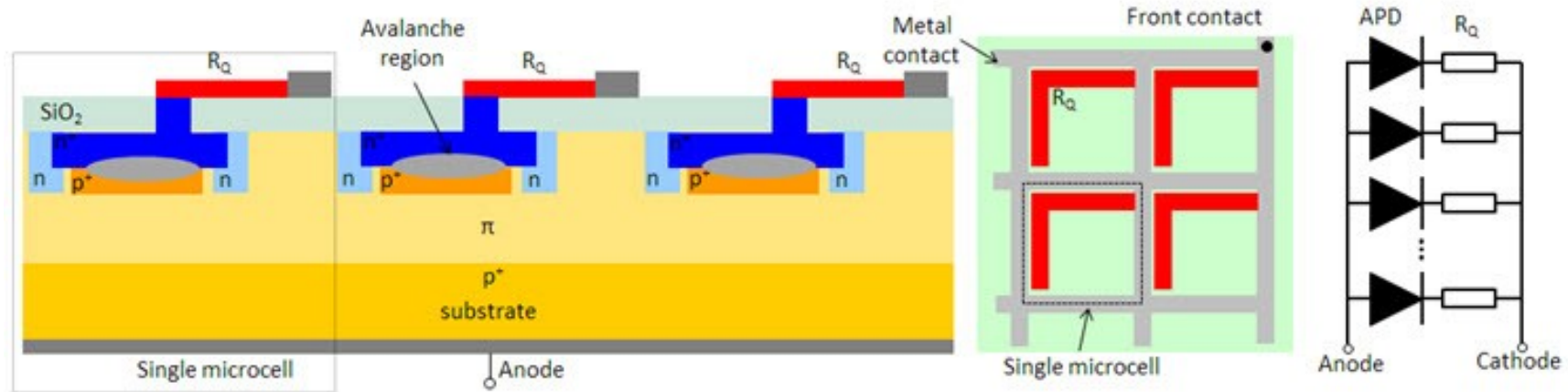


Micro-canali di connessione per la tensione

Singolo APD

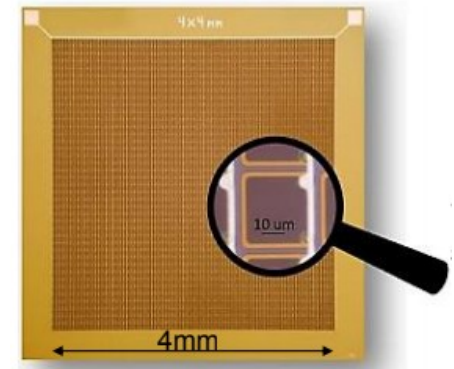
Bulk di silicio

SiPM: struttura



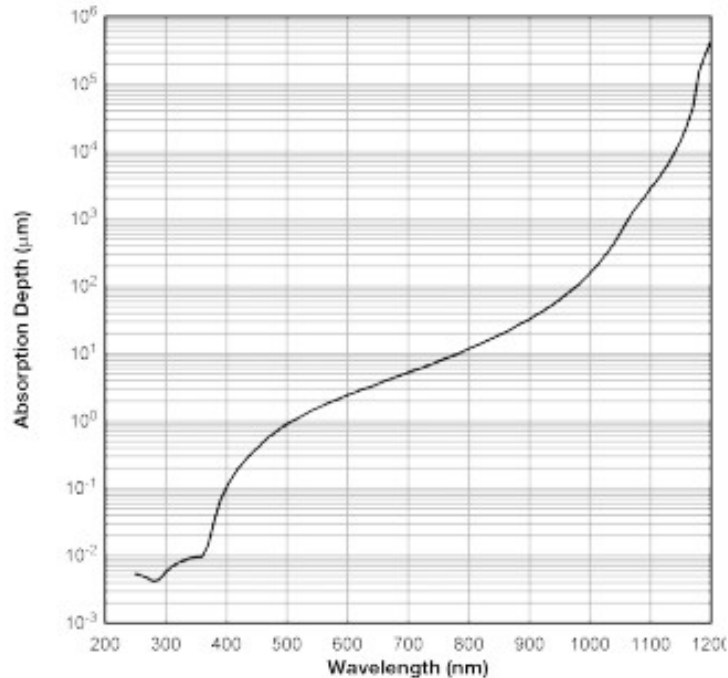
Caratteristiche principali di un SiPM:

- **grande area**;
- risposta **efficiente** alla luce UV-VIS;
- **basso costo**;
- **resistenti**;
- **compatti**;
- **semplici** (un anodo e un catodo);
- buon fill factor;
- buon range dinamico;



SiPM: qualche caratteristica

Photon Absorption in Silicon



Quando il fotone passa attraverso il Silicio viene assorbito con una data probabilità e trasferisce la sua energia all'elettrone legato che passa dalla banda di valenza a quella di conduzione: crea la coppia e-h.

La profondità di assorbimento dipende dall'energia del fotone!

SiPM: qualche caratteristica

La PDE (photon detection efficiency) quantifica la sensibilità del SiPM.

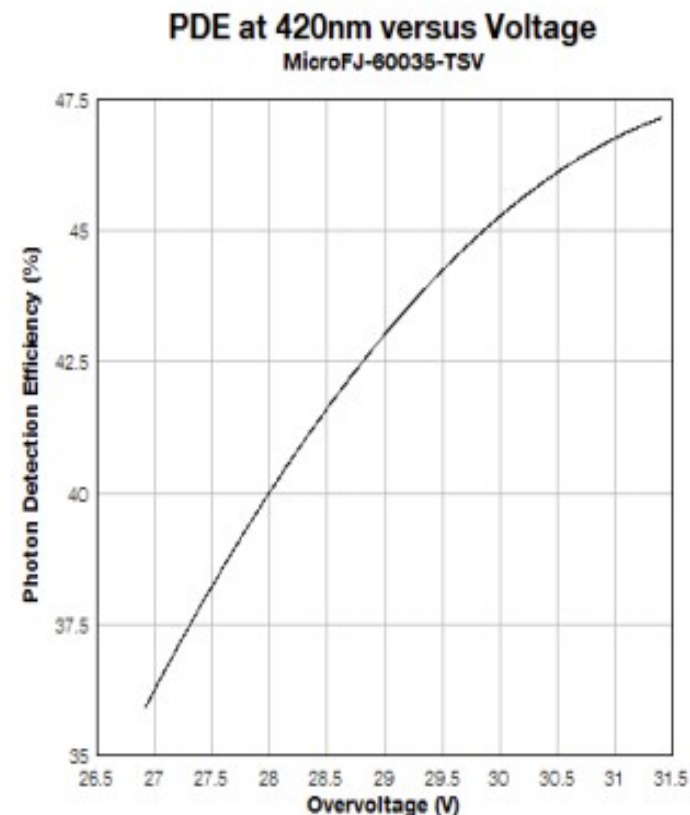
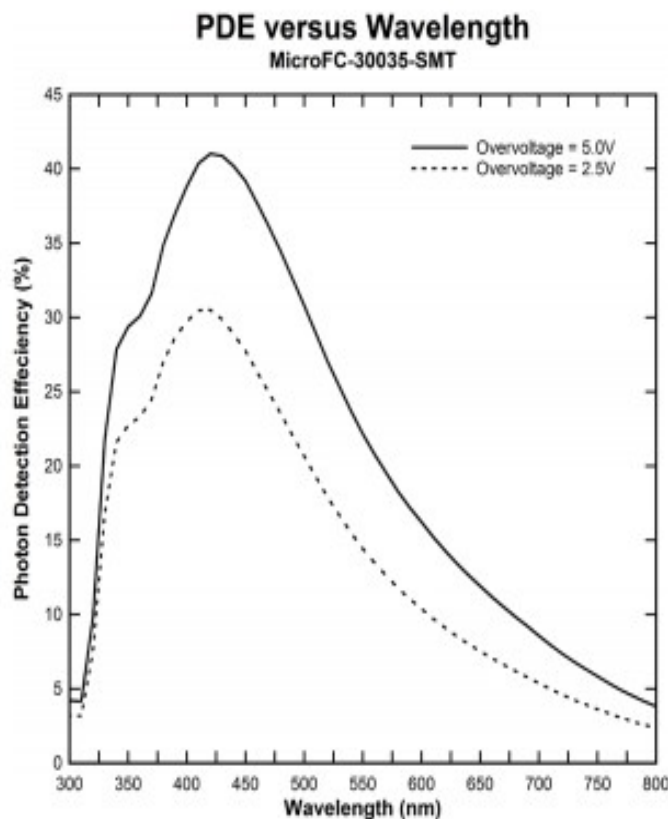
Dipende da:

- lunghezza d'onda;
- tensione applicata
- fill factor.

La PDE tiene conto della probabilità che un fotone interagisca con una cella e generi una valanga:

$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot \epsilon(V) \cdot F$$

Dove η è l'efficienza quantica del silicio, ϵ è la probabilità di iniziare una valanga e F è il fill factor del dispositivo.

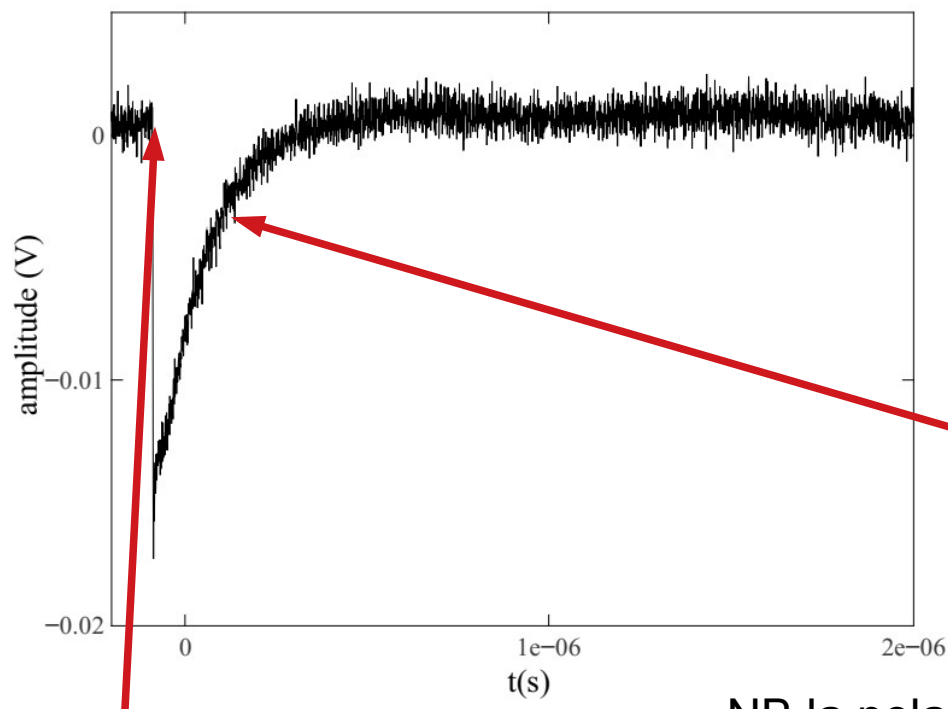


SiPM: segnale

Si imposta una tensione tra catodo e anodo (bias) di qualche volt superiore alla tensione di breakdown (il diodo è quindi polarizzato inversamente in regione di valanga). Questa tensione viene detta **overvoltage** (OV).

Quando un fotone viene assorbito in un singolo APD (cella) esso genera un bunch di elettroni molto velocemente che può essere letto tramite un amplificatore o direttamente da un oscilloscopio.

Dopo la **salita rapida**, il segnale ha un **tempo di ricarica caratteristico** ($\sim 120\text{ns}$) fino a tornare operativo.



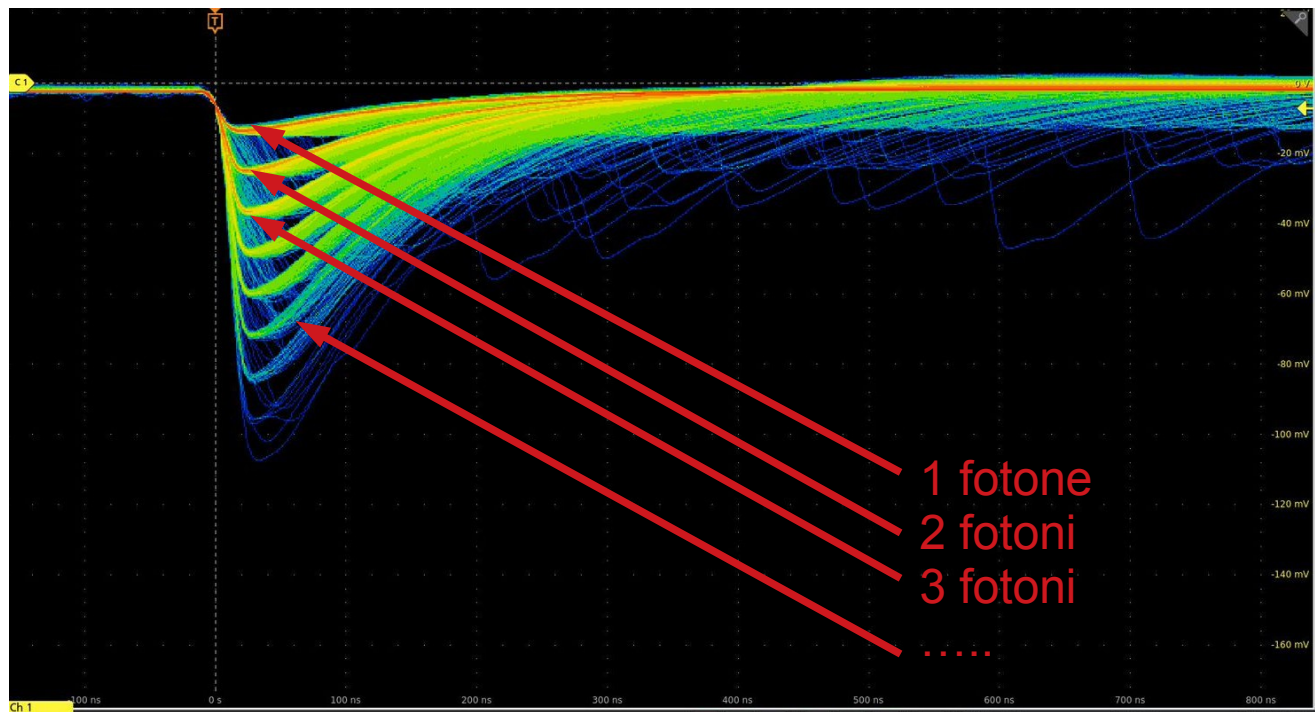
Il fotone è assorbito e genera la valanga ($\sim \text{ns}$)

La valanga viene smorzata

$$y \propto e^{\frac{-t}{\tau}};$$
$$\tau = R_q C_{\text{SiPM}}$$

NB la polarità del segnale è arbitraria

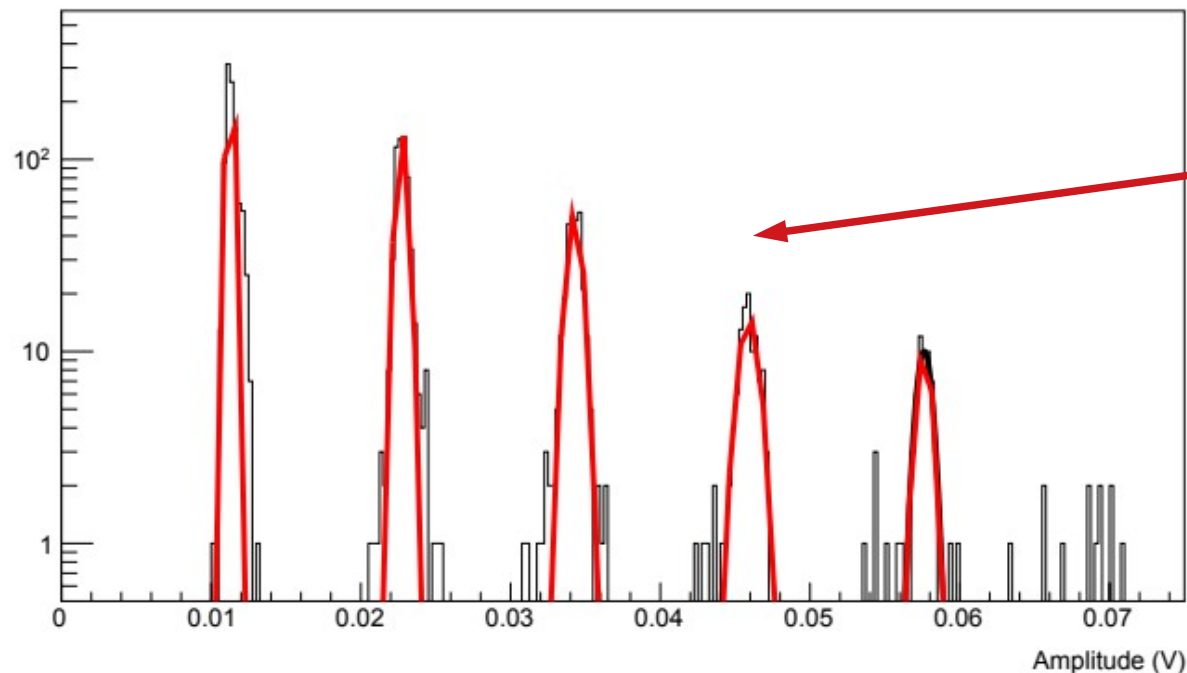
Segnale



Se i fotoni assorbiti sono tanti, il segnale sarà la **somma della carica proveniente da ciascuna cella**: la carica totale è lineare rispetto al numero di fotoni incidenti (almeno fino a quando i fotoni incidenti sono minori del numero di celle, poi non più).

$$\text{Carica totale} = N_{\text{celle colpite}} G_{\text{cella}} e$$

Curve di guadagno



Istogramma della **distribuzione delle ampiezze** dei singoli segnali. Il primo picco corrisponde al segnale generato da 1 fotone, il successivo 2, ...
Come ci aspettavamo la distanza tra i picchi è costante!

Questa curva è convoluta con una Poissoniana (statistica dei conteggi...)

SiPM al buio: dark noise

E se facciamo in modo che sul SiPM non giunga alcun fotone, cosa succede?

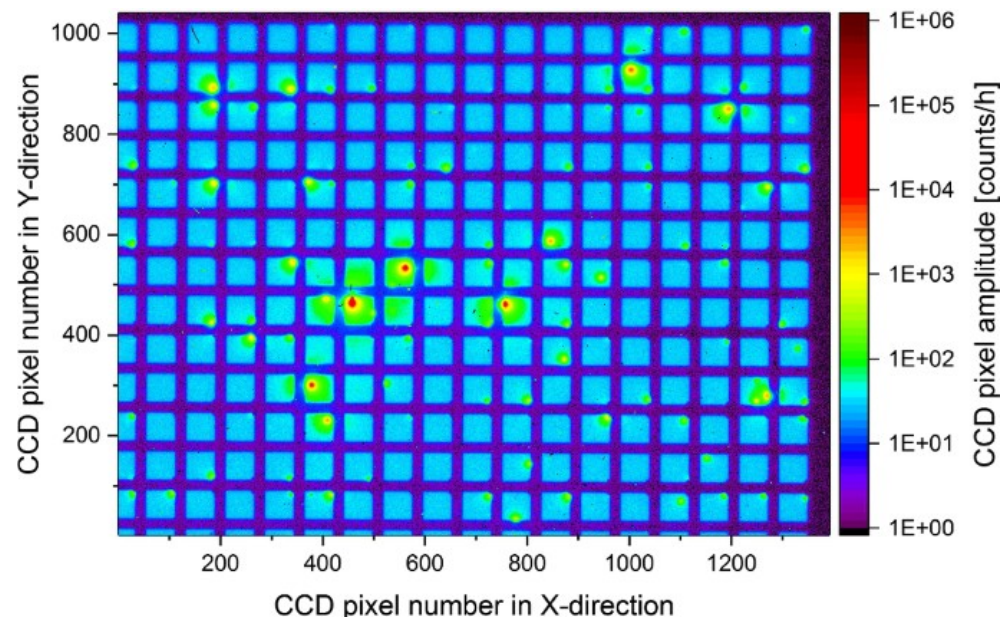
Notiamo dei segnali comunque! Si parla di **dark count rate (DCR)**

a) a temperatura ambiente questi segnali sono dovuti alla generazione termica di una coppia e-lacuna;

Rate tipica kHz/mm²

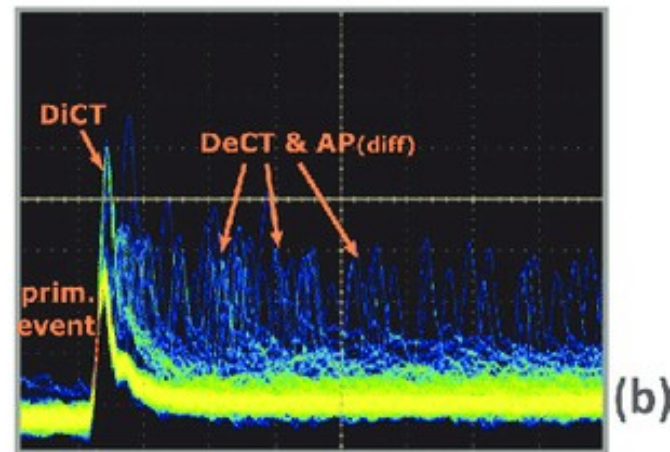
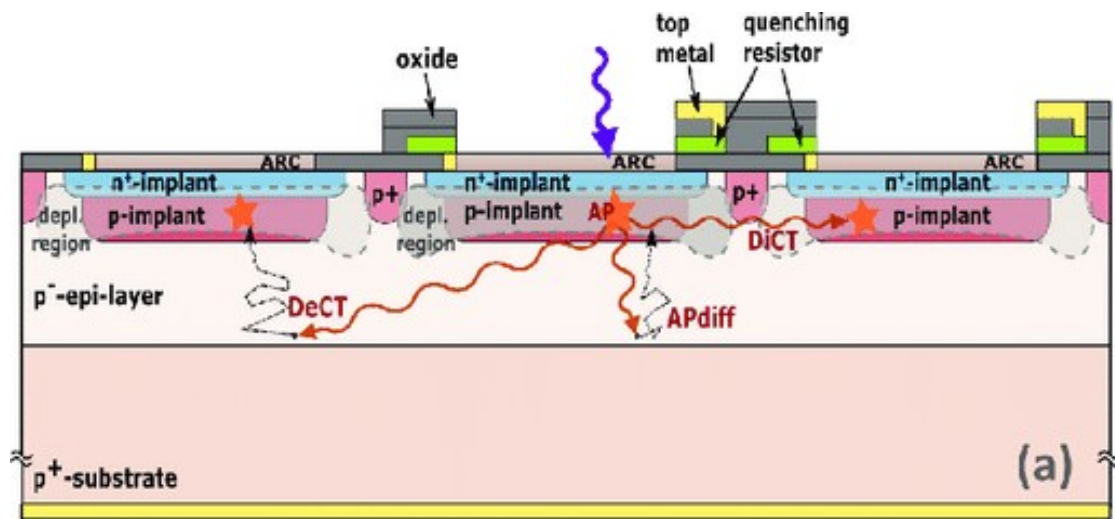
b) a temperature criogeniche invece sono dovuti alla generazione di una coppia e-lacuna dovuta all'effetto tunnel tra le bande del semiconduttore;

Rate tipica mHz/mm²



Non tutti i segnali sono perfetti...

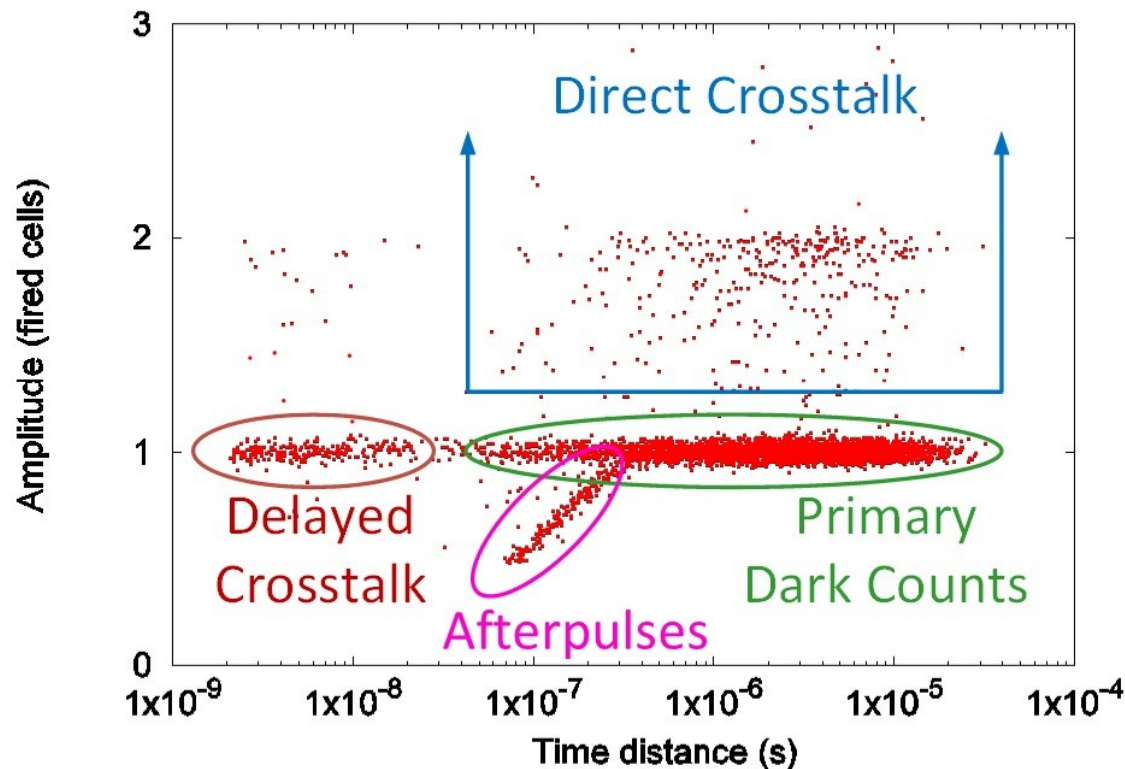
Ci sono altri 2 meccanismi che portano alla generazione di un segnale, questi sono: l'**afterpulse (AP)** e il **cross-talk (CT)** che può essere diretto o ritardato.



AP: nella medesima cella; CT tra due o più celle.

Correlated noise plot

Grazie a questo plot 2-dim si possono identificare facilmente i vari tipi di eventi sul SiPM



Sull'asse **x** c'è la **distanza temporale** tra 2 eventi successivi.

Sull'asse **y** c'è l'**ampiezza del segnale** letto sull'oscilloscopio rappresentata in termini di “numero di fotoni” incidenti.

Gli eventi di DCR primaria sono chiaramente la maggioranza, mentre CT e AP sono qualche % degli eventi di DCR.

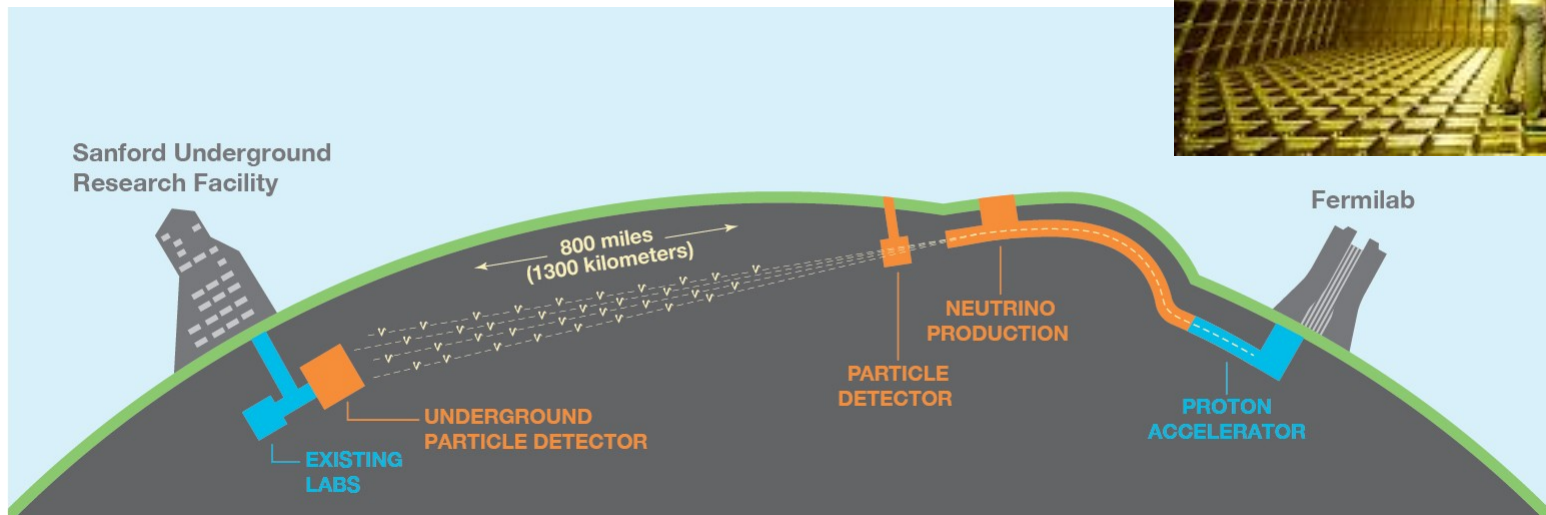
Questo plot a freddo è notevolmente diverso!

Dalla teoria alla pratica!

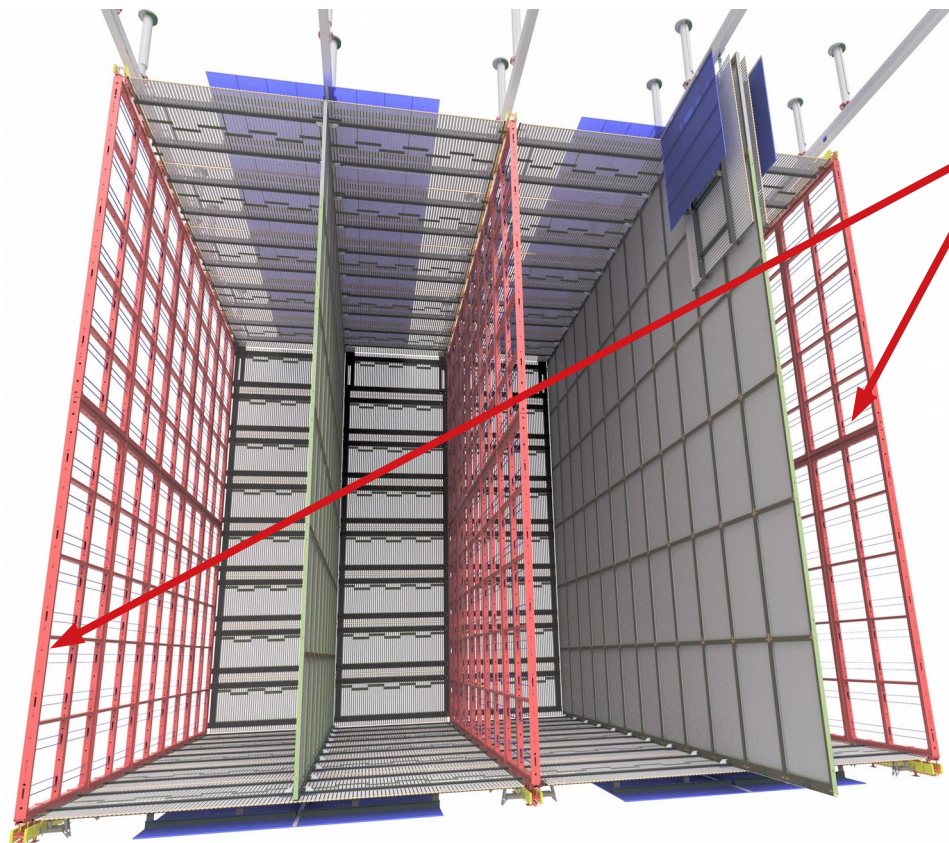
Ora che abbiamo visto cosa sono i SiPM e come si comportano in generale, vediamo quali test stiamo svolgendo in laboratorio e che tipo di segnali acquisiamo, così poi potete analizzare dei dati provenienti da misure reali

L'esperimento DUNE

DUNE è un esperimento di fisica dei neutrini. I neutrini prodotti a FNAL vengono rivelati sia localmente sia a 1300km nella miniera di Sanford tramite rivelatori TPC a LAr. I segnali prodotti in questi rivelatori sono sia di tipo carica, sia di tipo **luce**.



SiPM per DUNE



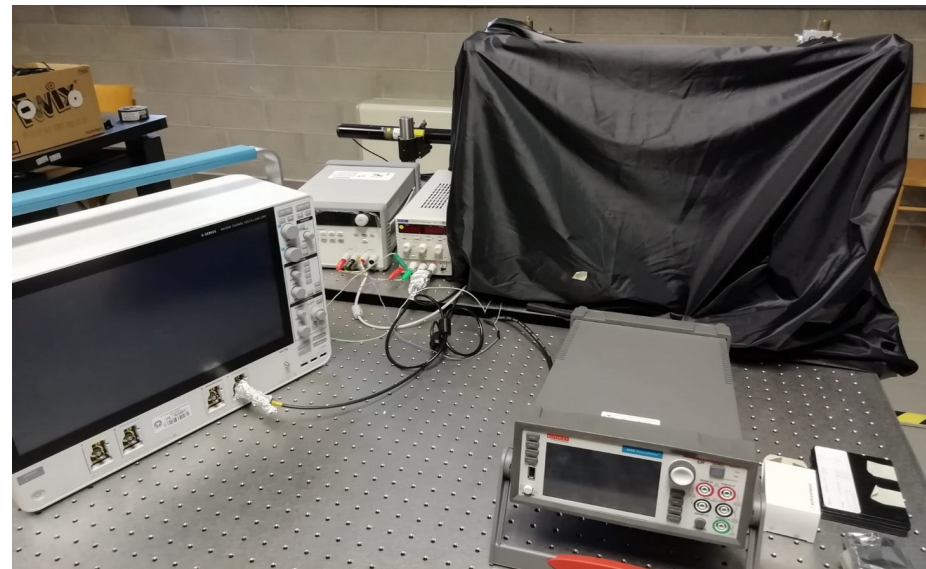
Il segnale di luce verrà letto da grandi matrici di SiPM

Dati i fenomeni fisici di interesse, le richieste sono stringenti:

- $DCR < 60 \text{ mHz/mm}^2$;
 - V_{bd} compatibili tra SiPM; diversi
 - bassa probabilità di CT e AP.
- I SiPM vanno prima testati in laboratorio** in modo tale che queste caratteristiche vengano controllate.

Test setup a Ferrara

- **Dewar** per raffreddamento SiPM a LN₂;
- **SMU** Keithley SM2450 per misure caratteristica IV (risoluzione <pA) a 2 fili cavi triassiali;
- **amplificatore a freddo** e **oscilloscopio** Tektronix MSO 6 (6.25Gs/s, 20MHz bandwidth, 500μV/div) per misurare i singoli segnali;
- **alimentatore** TTI 2 canali per tensione di bias SiPM.



Per evitare la luce i SiPM sono inseriti in una **dark-box** opportuna!

Misure

La caratterizzazione dei SiPM procede seguendo 2 diverse tipologie di misura: **curve IV** effettuate a caldo e a freddo e **misure di rumore** a freddo. Da queste, i parametri che si ricavano sono: **tensione di breakdown**, **resistenza di quenching**, **dark count rate**, probabilità di **cross-talk**, probabilità di **afterpulse**.

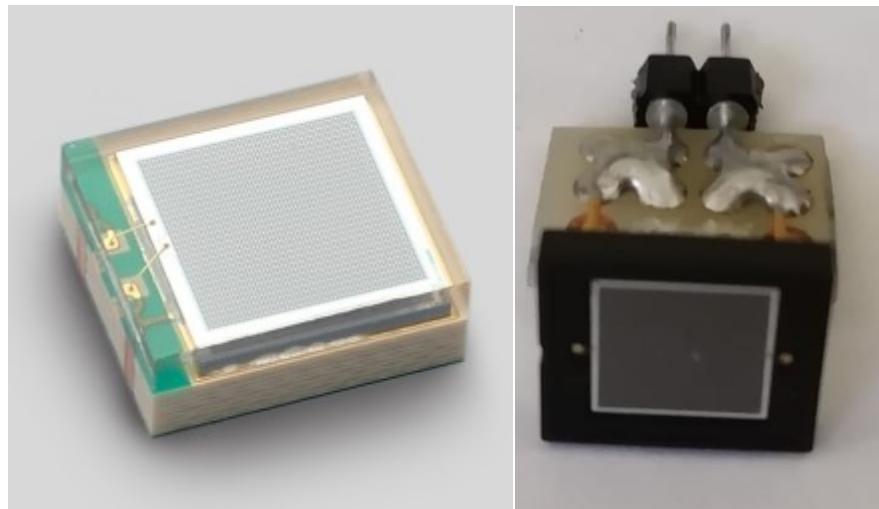
Tipologie di SiPM testate:

Hamamatsu

- 50 μ m passo, bassa resistenza di quenching;
- 75 μ m passo, bassa resistenza di quenching.

FBK

- 33 μ m passo, standard;
- 50 μ m passo, triple trench.



Curve IV

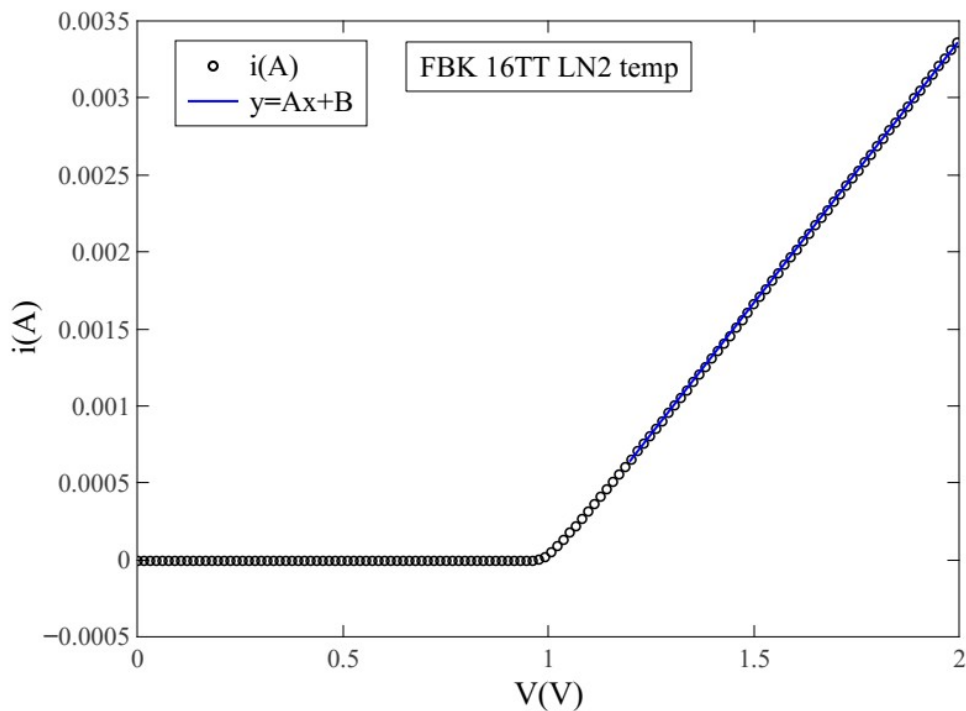
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1	Style	Standard																						
2	Append Mode																							
3	Fill Mode																							
4	Capacity	100000																						
5	Count	127																						
6	Base Time Seconds	1595510652																						
7	Base Time Fractional	.788484940																						
8	Index	Reading	Unit	Range Digits	Disp Digits	Math	Start Group	Limit1 High	Limit1 Low	Limit2 High	Limit2 Low	Terminal	Questionable	Origin	Value	Unit	Digits	Output	Sense	Source Limit	Overtemp	Date	Time	Fractional
9		11.00238350953e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1000103652477	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:12	.7884849
10		21.495889190295e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1149921119213	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:14	.00324281
11		32.186669512128e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1300063878298	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:15	.2179818
12		43.179305485546e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1449833214283	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:16	.4327083
13		54.6134136511e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1599975526333	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:17	.6474494
14		66.686009967893e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1750141978264	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:18	.86216351
15		79.688380764317e-09	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.1899968832731	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:20	.07689271
16		81.403425553548e-08	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2050063163042	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:23	.09731761
17		92.039121582698e-08	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2200115770102	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:24	.31208841
18		102.971866841506e-08	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2349906116724	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:25	.5268228
19		114.352386540063e-08	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2500037252903	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:26	.7415831
20		126.40073594127e-08	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2649718225002	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:27	.95631011
21		139.484584495567e-08	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2799744904041	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:29	.1710103
22		141.416186137249e-07	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.2950091660023	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:32	.14993661
23		152.135564614036e-07	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.3099899291992	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:33	.06743861
24		163.258587071286e-07	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.3250042796135	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:33	.98492841
25		175.031396312916e-07	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.3400108814240	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:34	.90241571
26		187.859522952458e-07	Amp DC	.00000001	5.5	F	F	F	F	F	F	Rear	F	Main	0.3549808263779	Volt DC	1T	2W	F	F		07/23/2020	13:24:35	.81988911

Lo strumento (SMU) fornisce molte colonne di dati (per lo più inutili...) in formato csv.
I dati che ci interessano sono i valori di corrente letta corrispondenti al dato valore di tensione applicata:

Corrente → colonna 2 (unità Ampere)

Tensione → colonna 15 (unità Volt)

IV in polarizzazione diretta



Esempio: SiPM FBK16 triple trench (11188 celle) a temperatura dell'azoto liquido (77K).

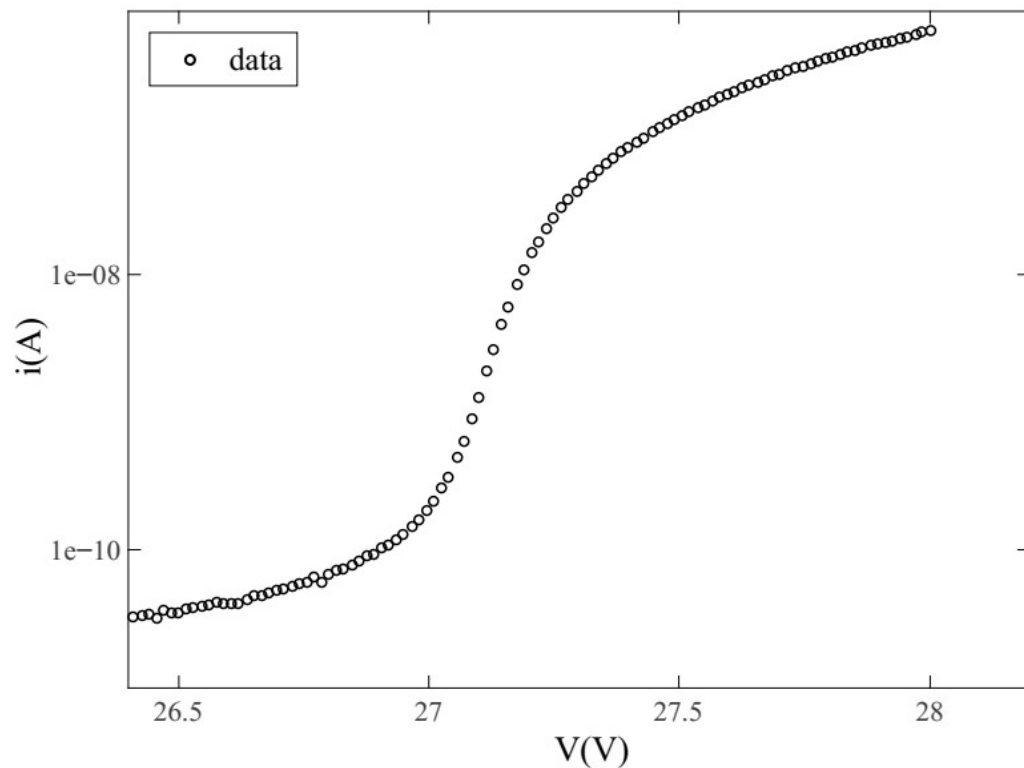
Dalla **pendenza della retta** nel tratto compreso tra (1.2-2)V possiamo ricavare il valore della resistenza totale del dispositivo e, conoscendo il numero di celle, il **valore della resistenza di quenching**.

Dal fit lineare $y = Ax + B$ otteniamo i parametri A e B.

$$\text{Ricaviamo: } R_{\text{SiPM}} = (293.3 \pm 0.2) \Omega$$

$$\text{Ricaviamo: } R_{\text{cella}} = (3.3 \pm 0.2) \text{ M}\Omega$$

IV in polarizzazione inversa



Esempio: SiPM FBK16 triple trench (11188 celle) a temperatura dell'azoto liquido (77K).

La tensione di breakdown è il valore del cambio di pendenza. Un metodo per trovare questo valore può essere quello di trovare il massimo della curva:

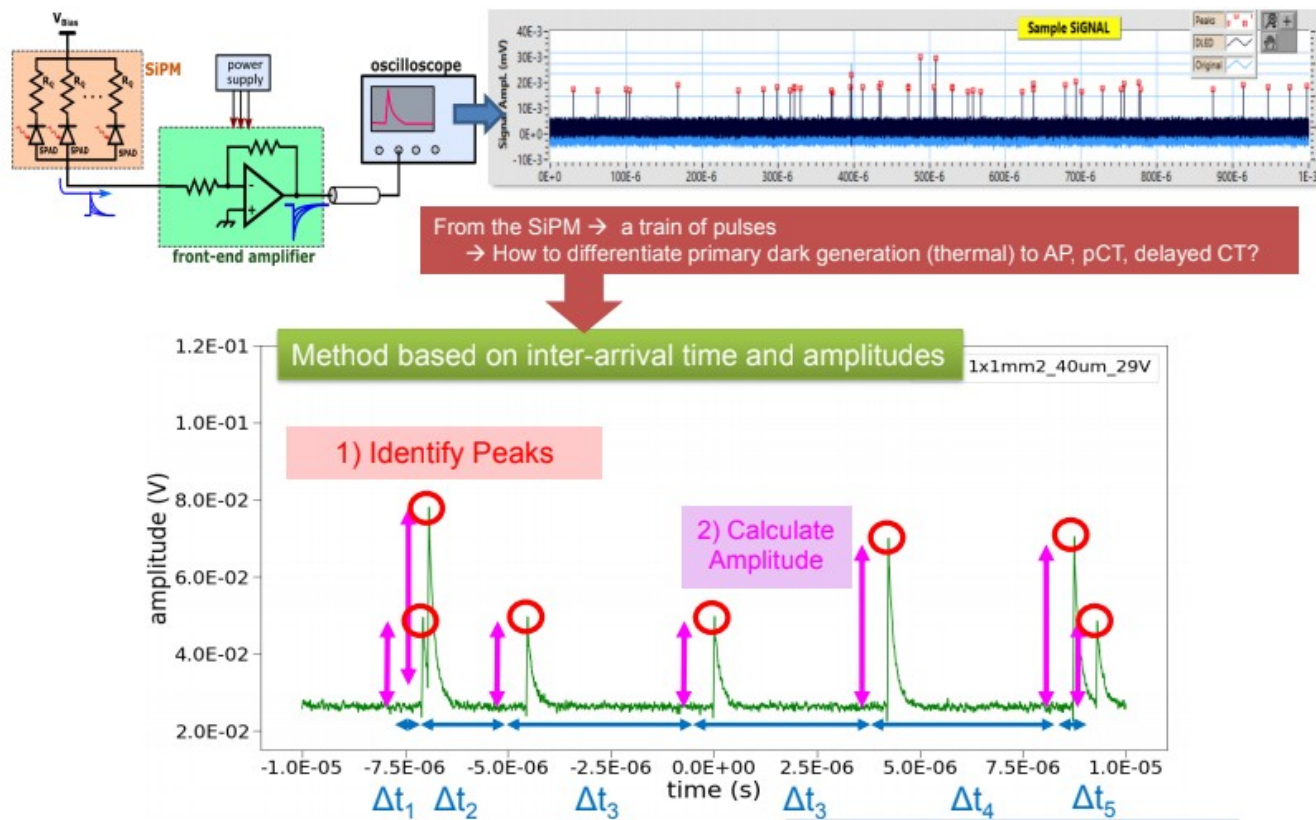
$$i^{-1} di/dV$$

Ricaviamo $V_{bd} = (27.112 \pm 0.003)V$

NB la tensione è espressa in modulo! (ha segno opposto rispetto a quella in polarizzazione diretta)

Misure di DCR e correlated noise

Una volta raffreddato il SiPM e impostata opportunamente la tensione di lavoro ($+xOV$), viene impostato il trigger ad un valore di tensione corrispondente a 0.5p.e. L'oscilloscopio viene impostato in modalità "fast frame" la quale permette di acquisire **3000 forme d'onda in finestre temporali da $4\mu s$** evitando i tempi morti tra acquisizioni successive.



NB p.e.=fotoelettrone

Misure di DCR e correlated noise

File tempi

	A	B	C	D
1	X: (s);Y: (Hz)			
2	0			
3	1,1.06331e-05			
4	2,6.28768e-06			
5	3,8.14146e-06			
6	4,7.91706e-06			
7	5,6.74932e-06			
8	6,6.94048e-06			
9	7,1.23128e-05			
10	8,8.56218e-06			
11	9,1.13527e-05			
12	10,2.45135e-05			
13	11,0.493783			
14	12,2.59354			
15	13,1.93856			
16	14,4.74138e-05			
17	15,7.4624e-06			
18	16,0.000164638			
19	17,6.88988e-06			
20	18,0.527084			
21	19,1.49328			
22	20,0.0002572			
23	21,0.00205492			
24	22,2.40406e-06			
25	23,2.26605e-06			
26	24,2.48153e-06			
27	25,1.50912e-06			
28	26,2.36856e-06			
29	27,1.38262e-06			
30	28,2.41822e-06			
31	29,2.39872e-06			
32	30,2.40002e-06			
33	31,2.4016e-06			

File forme d'onda

	A	B	C	D
1	Model	M5064		
2	Waveform Type	ANALOG		
3	Horizontal Units	s		
4	Sample Interval	1.600000e-10		
5	Record Length	2500		
6	Zero Index	584.109375		
7	Vertical Units	V		
8	FastFrame Count	2000		
9				
10	TIME	CH1		
11	-9.354813e-08	-4.023437e-04		
12	-9.338813e-08	-4.031250e-04		
13	-9.322813e-08	-4.046875e-04		
14	-9.306813e-08	-4.054687e-04		
15	-9.290813e-08	-4.062500e-04		
16	-9.274813e-08	-4.070313e-04		
17	-9.258813e-08	-4.085938e-04		
18	-9.242813e-08	-4.093750e-04		
19	-9.226813e-08	-4.109375e-04		
20	-9.210813e-08	-4.117187e-04		
21	-9.194813e-08	-4.132812e-04		
22	-9.178813e-08	-4.140625e-04		
23	-9.162813e-08	-4.156250e-04		
24	-9.146813e-08	-4.164062e-04		
25	-9.130813e-08	-4.179687e-04		
26	-9.114813e-08	-4.187500e-04		
27	-9.098813e-08	-4.203125e-04		
28	-9.082813e-08	-4.210937e-04		
29	-9.066813e-08	-4.226563e-04		
30	-9.050813e-08	-4.234375e-04		
31	-9.034813e-08	-4.250000e-04		
32	-9.018813e-08	-4.257812e-04		
33	-9.002813e-08	-4.273437e-04		
34	-8.986813e-08	-4.289062e-04		
35	-8.970813e-08	-4.304687e-04		
36	-8.954813e-08	-4.312500e-04		
37	-8.938813e-08	-4.328125e-04		
38	-8.922813e-08	-4.343750e-04		
39	-8.906813e-08	-4.359375e-04		
40	-8.890813e-08	-4.367187e-04		
41	-8.874813e-08	-4.382813e-04		
42	-8.858813e-08	-4.398438e-04		
43	-8.842813e-08	-4.414062e-04		
44	-8.826813e-08	-4.421875e-04		
45	-8.810813e-08	-4.437500e-04		
46	-8.794813e-08	-4.445312e-04		
47	-8.778813e-08	-4.460937e-04		

I dati vengono infine salvati in 2 files:

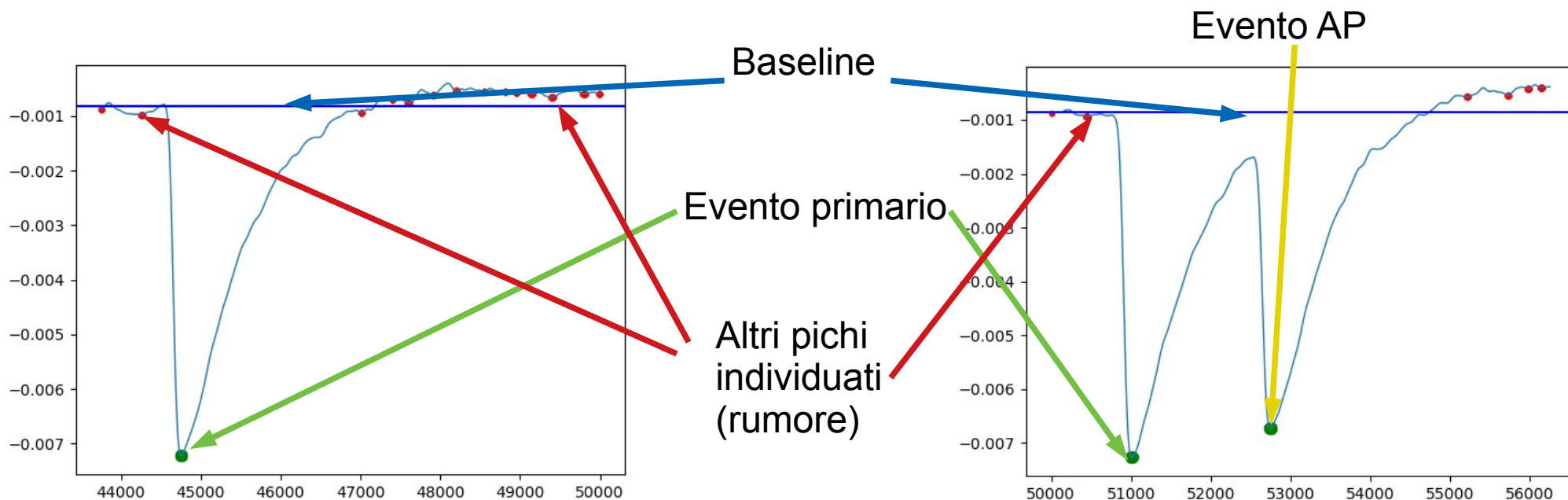
- a) contiene il **tempo di trigger** relativo a ciascun evento;
- b) contiene le **singole forme d'onda** organizzate su 2 colonne (tempo-ampiezza) in cui ciascuna forma d'onda è appesa a quella precedente.

A partire dai 2 files è possibile ricostruire ciascuna forma d'onda e associare a ciascuna il tempo assoluto di misura. In ognuna di queste verrà individuato il picco e l'ampiezza del segnale relativamente alla baseline.

Al termine **si ha quindi l'ampiezza di ciascun evento e il tempo assoluto al quale è avvenuto.**

Misure di DCR e correlated noise

Vengono quindi individuati i valori di ampiezza del picco ed il corrispondente intervallo di tempo passato rispetto al picco precedente.



Misure di DCR e correlated noise

Così facendo viene costruito il plot **2-dim relativo al correlated noise** in cui l'ampiezza degli eventi trovati è espressa in funzione dell'intervallo di tempo tra 2 eventi successivi. Da questo plot si può calcolare:

- **DCR primaria** (solitamente espressa in **Hz**);
- eventi di **CT** (solitamente espressi come **%**);
- eventi di **AP** (solitamente espressi come **%**).

