



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

Laboratorio di Elettronica

Marco Aglietta – Ernesto Migliore

aglietta@to.infn.it

migliore@to.infn.it

CFU 6 - A.A. 2021/22

Corso di laurea in Fisica

Cenni di optoelettronica

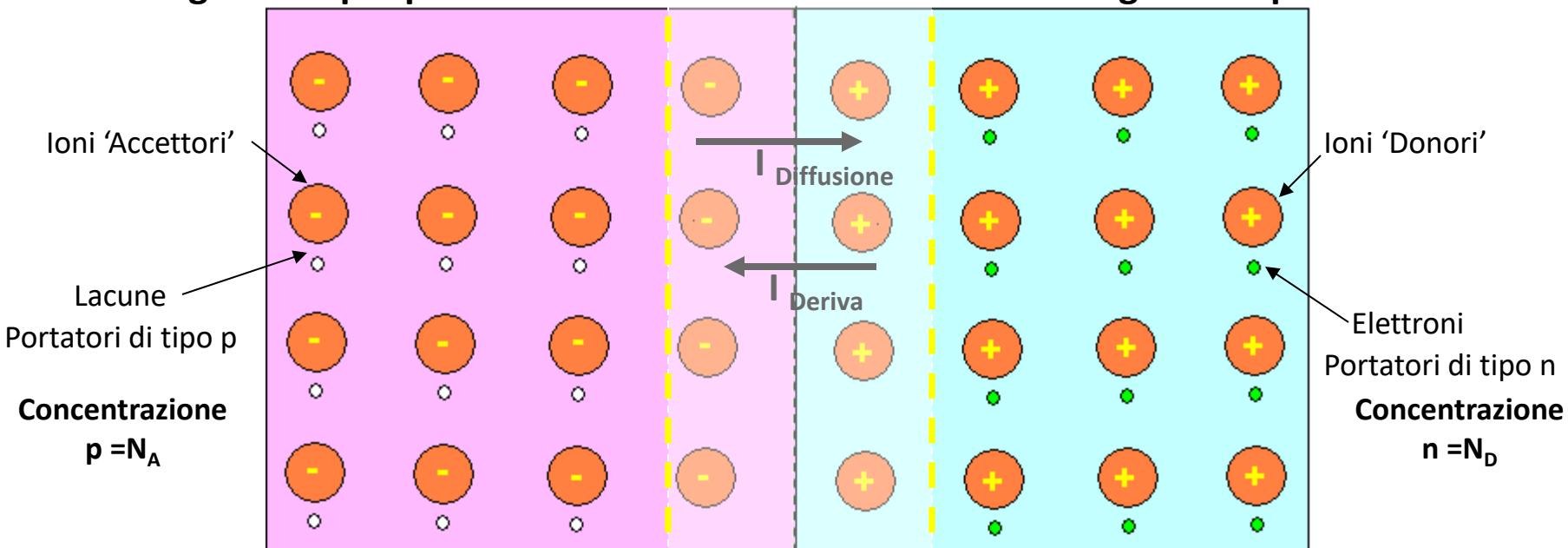
- LED
- Fotodiodi
- Sipm

Giunzione p-n

Semiconduttore
drogato di tipo 'p' .

E

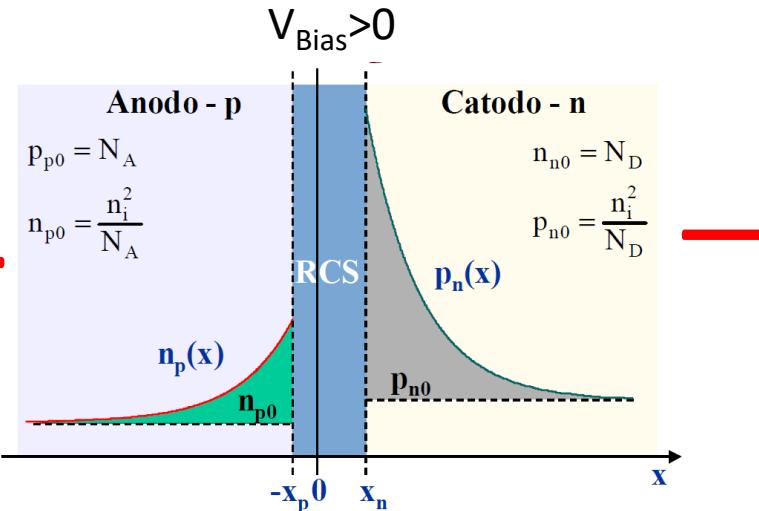
Semiconduttore
drogato di tipo 'n' .



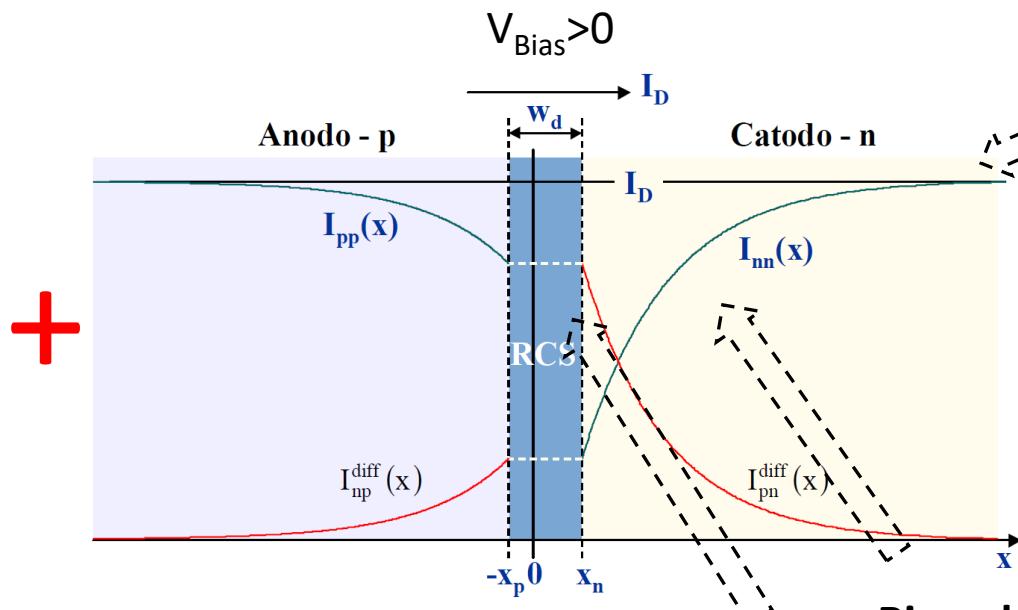
- Sulla giunzione si ha un gradiente della densità di carica → Diffusione di cariche attraverso la giunzione (elettroni verso sinistra, e lacune verso destra)
- In prossimità della giunzione avviene una ricombinazione con i portatori del lato opposto. Si genera una regione priva di portatori di carica (**Regione di Svuotamento di larghezza $\sim 0.5\mu\text{m}$**) con densità di cariche scoperte di segno opposto sui due lati che producono un campo elettrico E e quindi una differenza di potenziale V_o .
- Si raggiunge rapidamente una condizione di equilibrio in cui la corrente di diffusione è bilanciata dalla corrente di deriva associata al campo elettrico E

$$I_{\text{Diffusione}} = I_{\text{Deriva}}$$

Polarizzazione diretta $V_{Bias} > 0$:



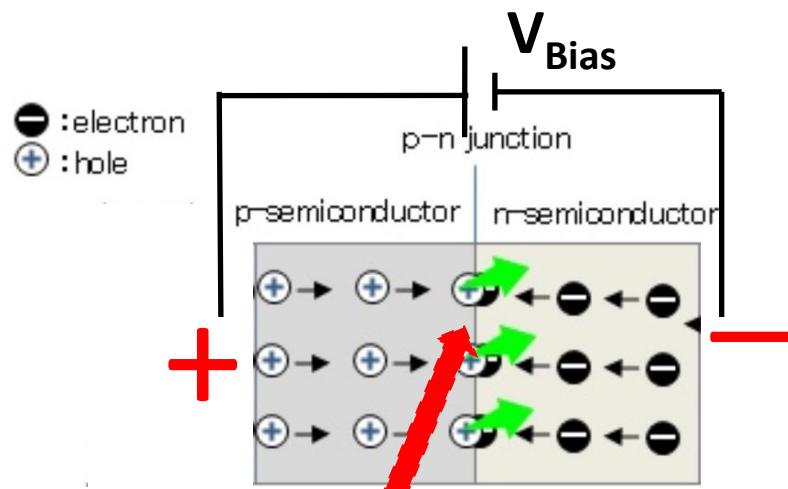
- Diminuzione della barriera di potenziale
- Restringimento della regione di svuotamento (minore resistenza)
- Aumenta la Diffusione di maggioritari attraverso la barriera che si ricombinano dopo poche lunghezze di diffusione (decine di micron)



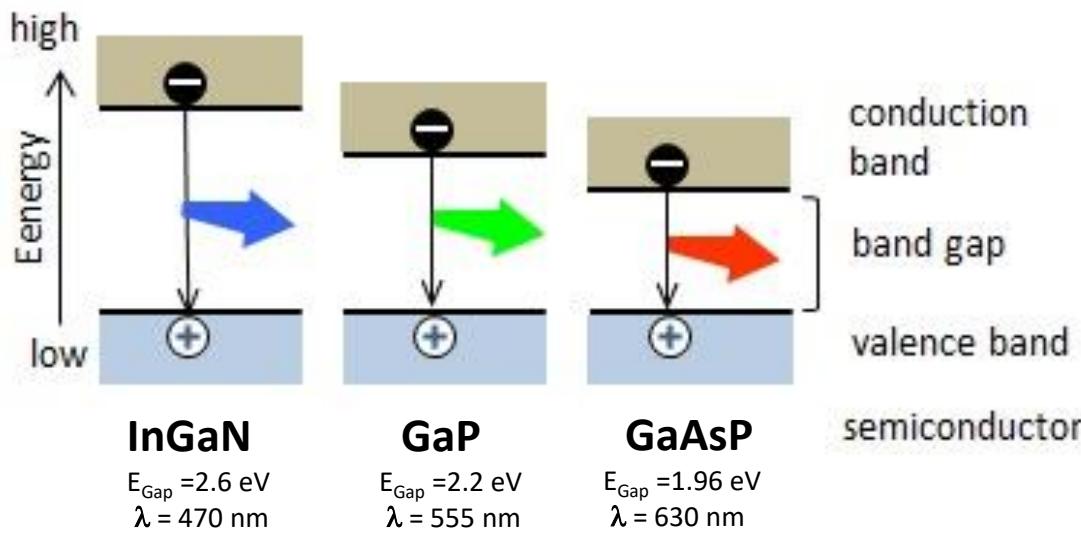
Flusso di corrente nel diodo deve essere costante (legge correnti, nodi di Kirchhoff)

Ricombinazioni elettroni - lacune nei primi μm oltre la regione di svuotamento

Polarizzazione diretta $V_{Bias} > 0$



Ricombinazione con emissione di fotoni



LED (Light Emission Diode)

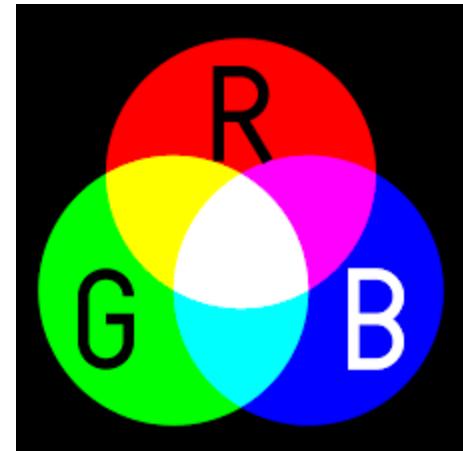
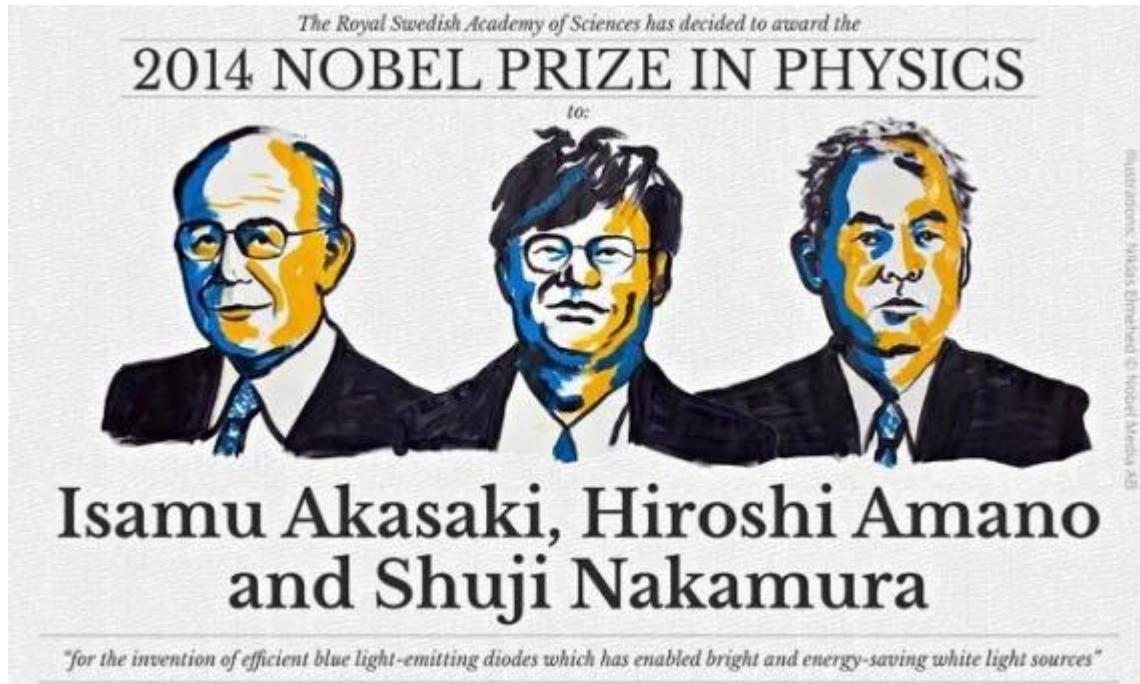
Per Si e Ge l'energia della ricombinazione si converte in calore (GAP indiretto). Per i LED si utilizzano materiali semiconduttori composti da elementi di gruppo 3 e 5. (GaAs, GaP, GaAsP, GaInN ...) L'ampiezza del Gap energetico determina il colore (l'energia dei fotoni emessi).

boro	carbonio	azoto	ossigeno	
13 26.22	14 28.09	15 30.27	16 32.07	17
Al	Si	P	S	C
alluminio	silicio	fosforo		
21 69.72	22 72.53	33 74.92	34	35
Ga	Ge	As	Se	B
gallio	germanio	arsenico		
49 114.82	50 112.69	51 121.75	52	53
In	Sn	Sb	Te	I
indiio	stagno	antimonio		
51	62 207.2	53	54	55
Tl	Pb	Bi	Po	A
talio	piombo			

$$1\text{eV}=1.602\times 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$E_{\text{fotone}} (\text{eV}) = (hv)/e = (hc)/\lambda e$$

$$E_{\text{fotone}} (\text{eV}) = 1240/\lambda(\text{nm})$$



"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"

They succeeded where everyone else had failed. Akasaki worked together with Amano at the University of Nagoya, while Nakamura was employed at Nichia Chemicals, a small company in Tokushima. Their inventions were revolutionary. Incandescent light bulbs lit the 20th century; the 21st century will be lit by LED lamps.



Anode

Cathode

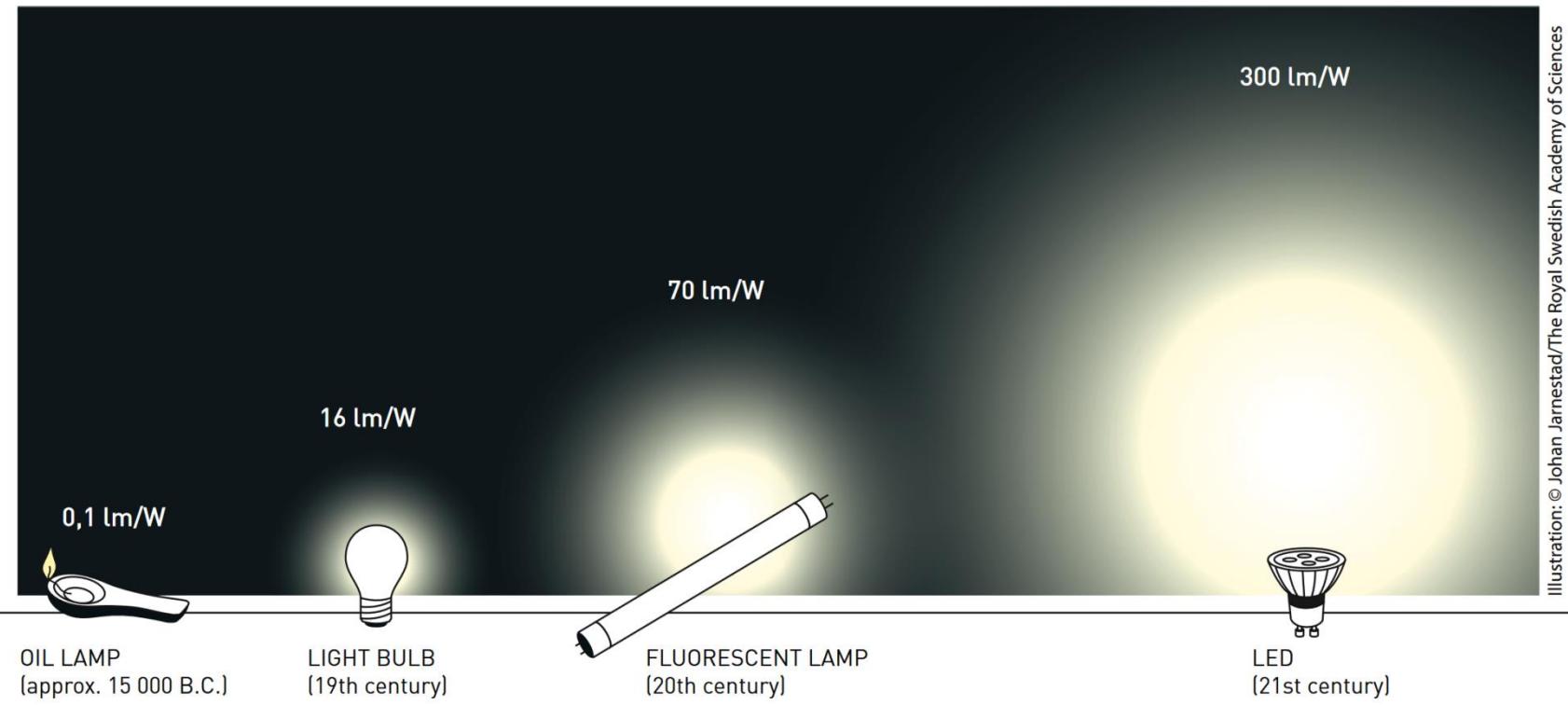
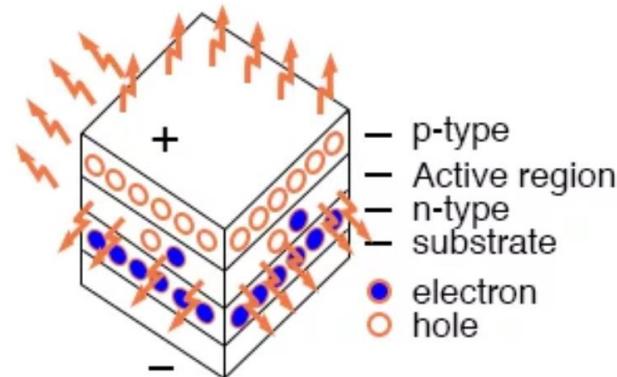
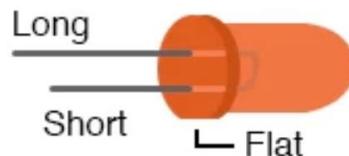
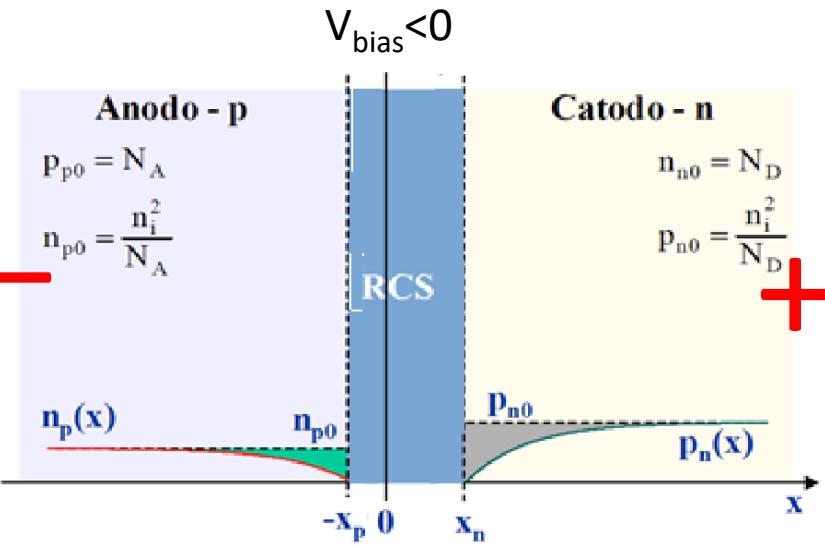


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Polarizzazione inversa $V_{Bias} < 0$:



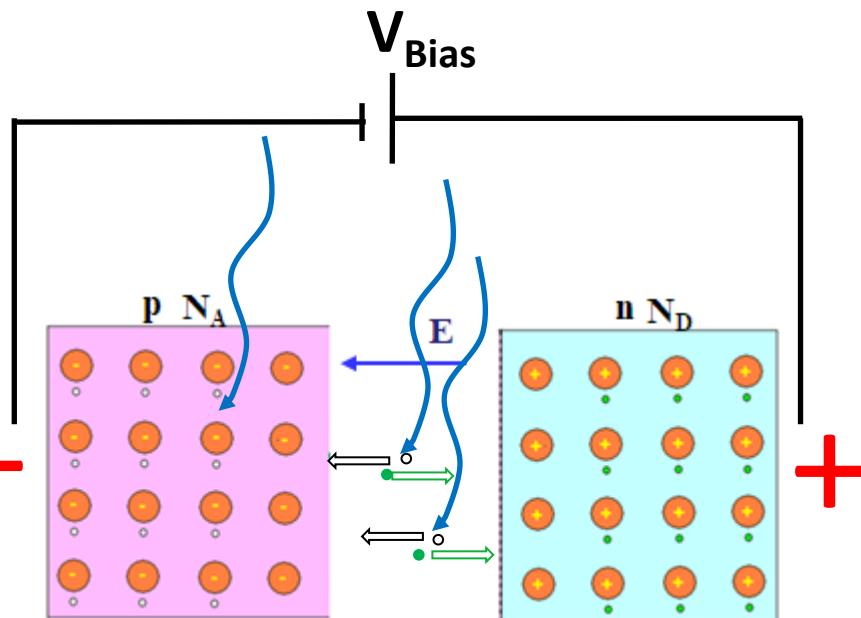
- Aumento della barriera di potenziale
- Allargamento della regione di svuotamento (maggiore resistenza) e diminuzione capacità.
- Per valori non eccessivi di polarizzazione inversa resta invariata la corrente I_o di deriva dei minoritari generati termicamente che 'scendono' la barriera di potenziale.

Capacità della giunzione polarizzata inversamente ($V_{Bias} < 0$).

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{q \epsilon_s \frac{N_A N_D}{2(N_A + N_D)} \frac{1}{(V_o - V_{bias})}}$$

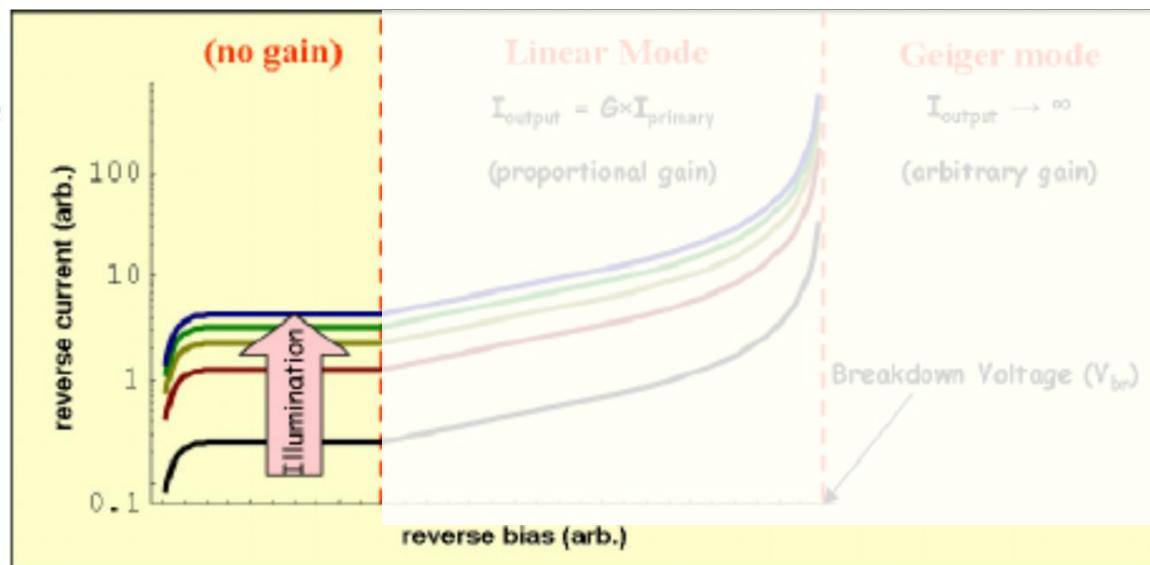
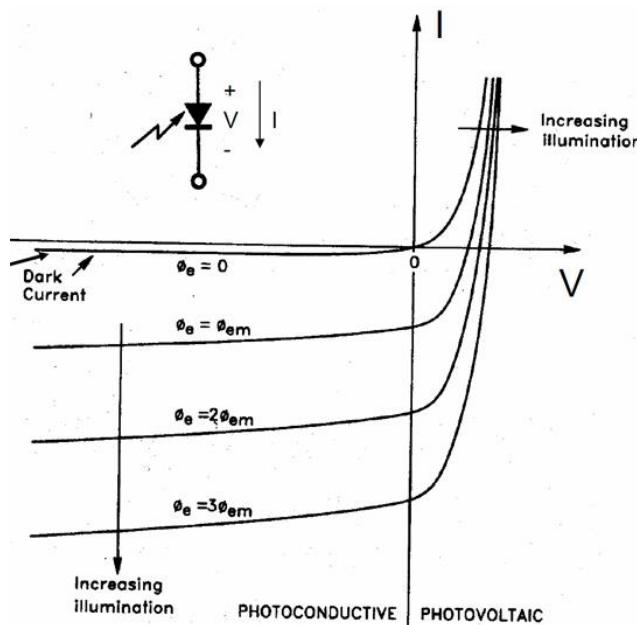
A parità di superficie della giunzione la capacità dipende solo dalla quantità di drogaggio e dalla tensione inversa applicata .

Fotodiodi - polarizzazione inversa.



Fotoni di energia sufficiente possono creare coppie elettrone – lacuna per ‘effetto fotoelettrico’.

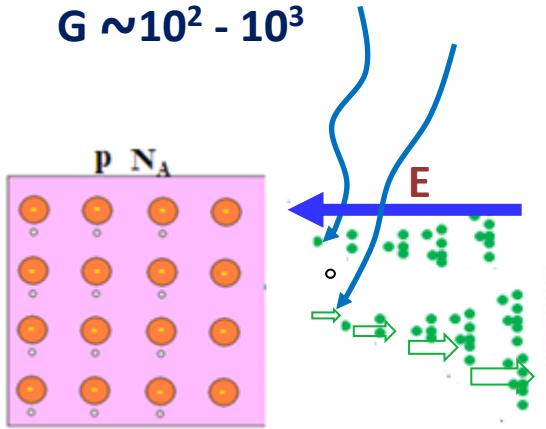
Se il processo avviene nella regione di svuotamento allora i portatori non si ricombinano e grazie al campo elettrico sulla giunzione migrano, gli elettroni verso il catodo e le lacune verso l’anodo, dando origine ad una ‘fotocorrente’ proporzionale al numero di fotoni incidente alla intensità della luce).



Avalanche photodiode (APD) & Single photon avalanche photodiode (SPAD)

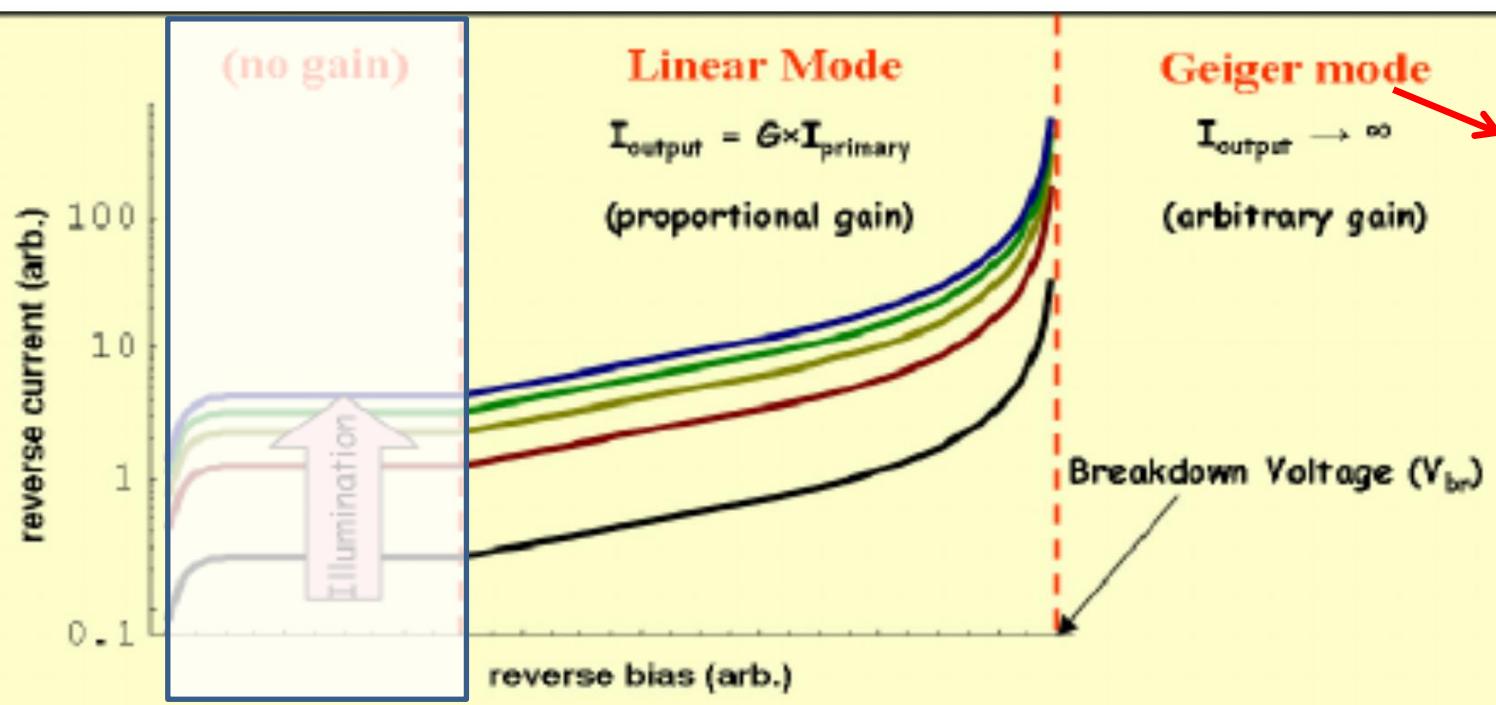
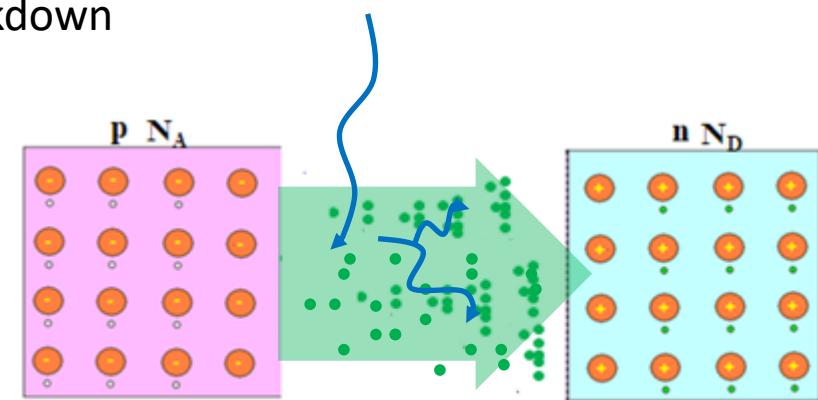
APD $V_{\text{Bias}} < V_{\text{BD}}$ (Prop MODE)

$G \sim 10^2 - 10^3$



SPAD $V_{\text{Bias}} > V_{\text{BD}}$ (GEIGER MODE)

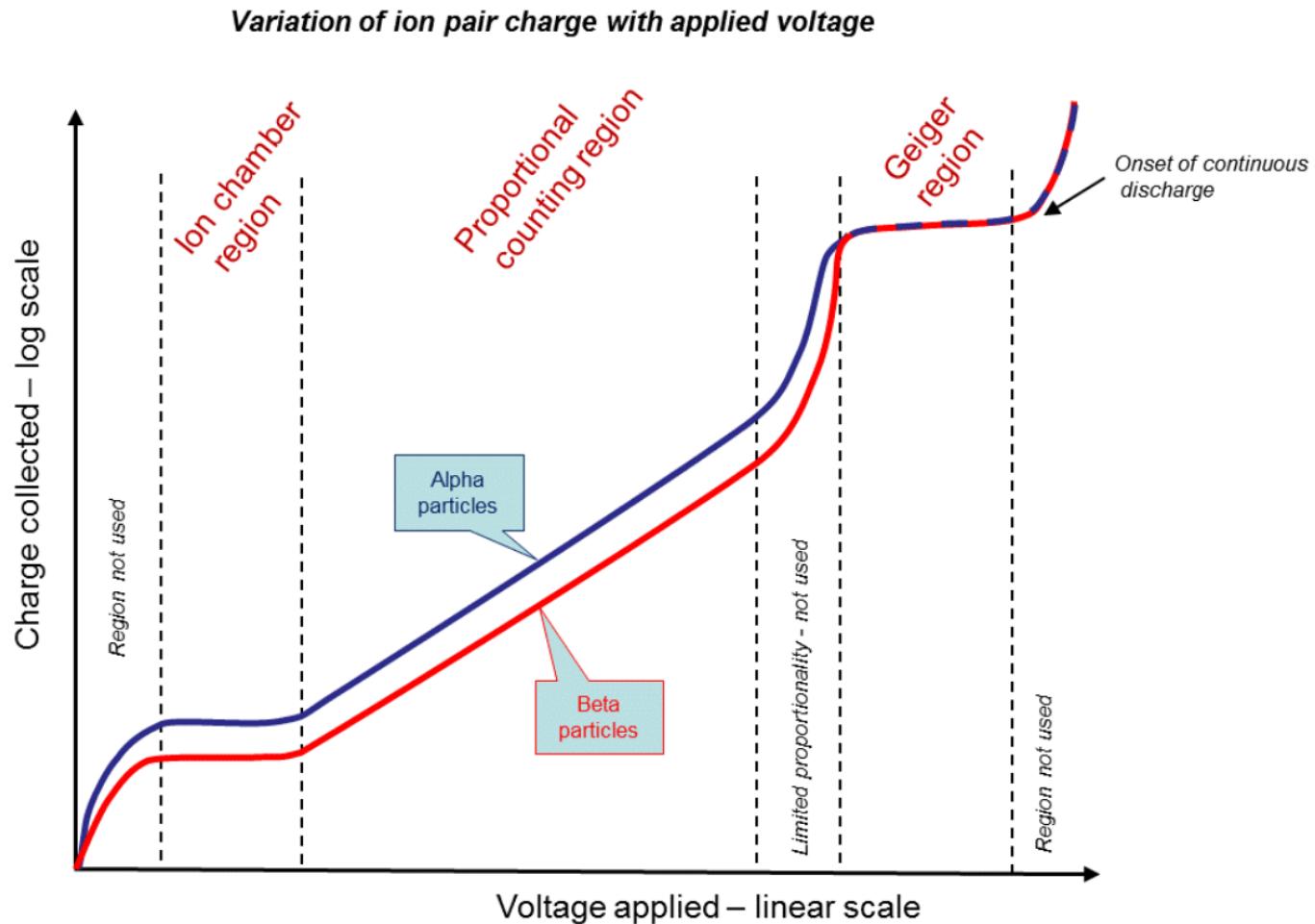
$G \sim 10^7 - 10^8$



Il fattore di moltiplicazione diverge.
Il processo di moltiplicazione a valanga si autosostiene

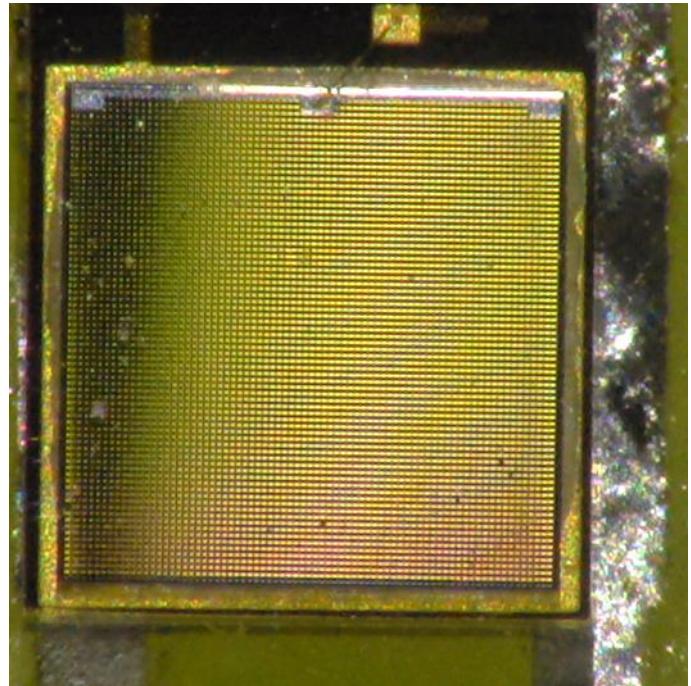
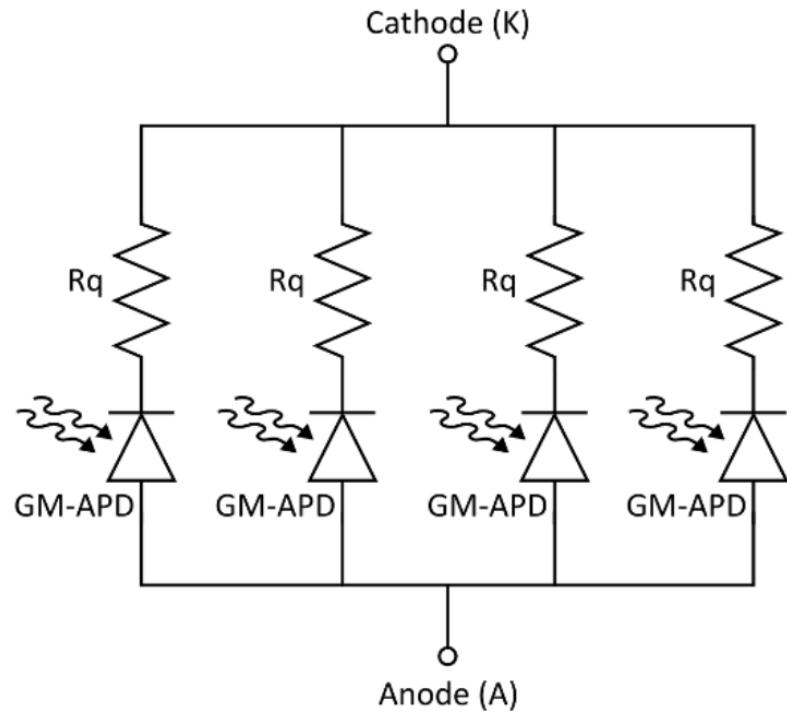
$E > 10^5 \text{ V/cm} !!!$

Practical Gaseous Ionisation Detection Regions

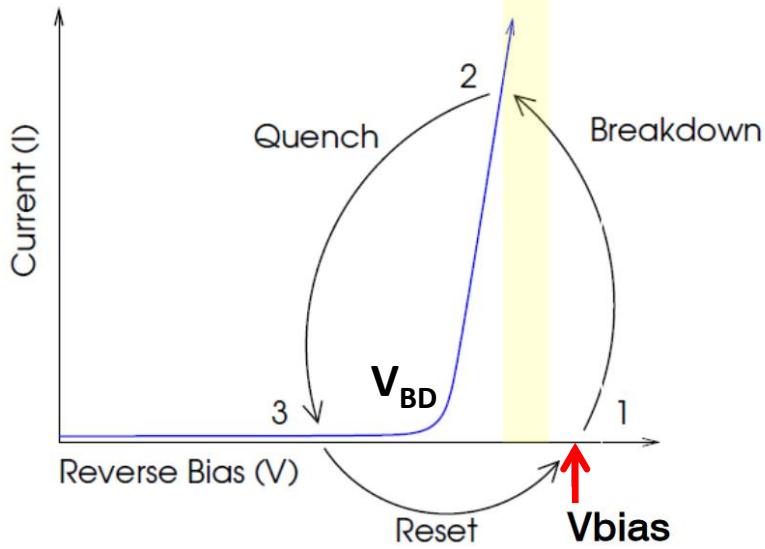


Silicon Photomultipliers SIPMs

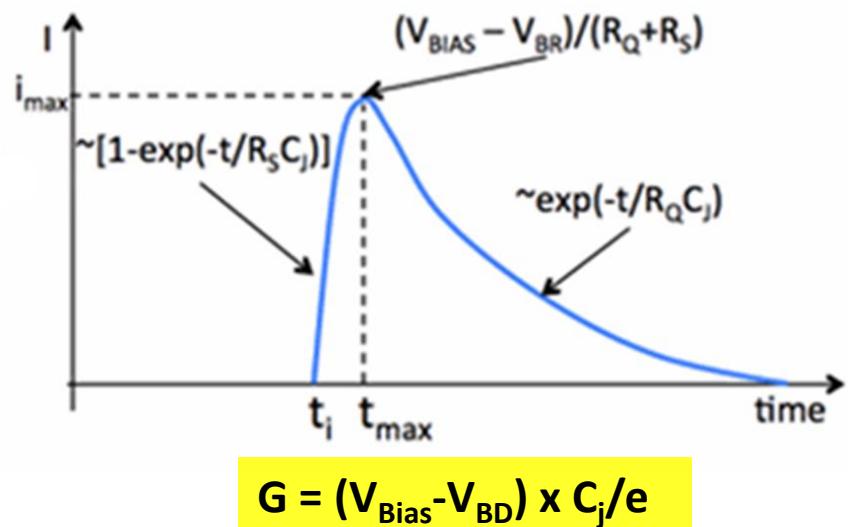
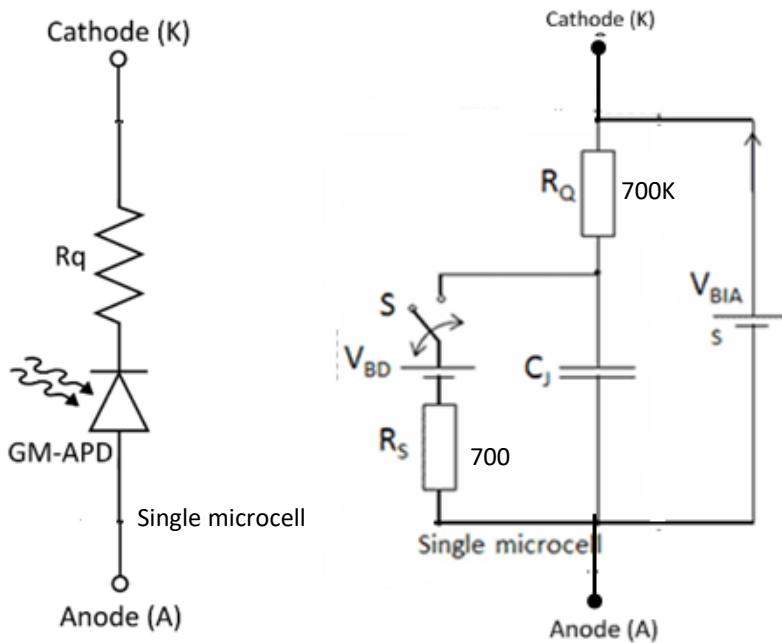
Matrice di SPAD ciascuno in serie ad una resistenza di quenching. Il guadagno è limitato a $\sim 10^6$



Ciascun SPAD e' una cella della matrice e ha dimensione compresa tra $10\mu\text{m}^2 - 50\mu\text{m}^2$



- 1) Le giunzioni SPAD sono polarizzate ad una tensione V_{Bias} superiore a quella di breakdown. Il fotone provoca la scarica (Geiger) della capacità di giunzione (C_j) producendo un intenso impulso di corrente con fronte di salita rapidissimo ($\tau=R_s C_j$). R_s è la resistenza del canale di scarica del singolo SPAD.
- 2) Questo impulso di corrente provoca una caduta di tensione su R_Q facendo scendere la polarizzazione al di sotto della tensione di BD.
- 3) Segue una fase di ricarica (Reset) in cui lentamente ($\tau=R_Q C_j$) la tensione risale oltre V_{BD}



$$G = (V_{Bias} - V_{BD}) \times C_j / e$$

ASD-NUV1S-P

3

1x1 mm² NUV SiPMs Low Afterpulse

SiPM active area: 1x1 mm²

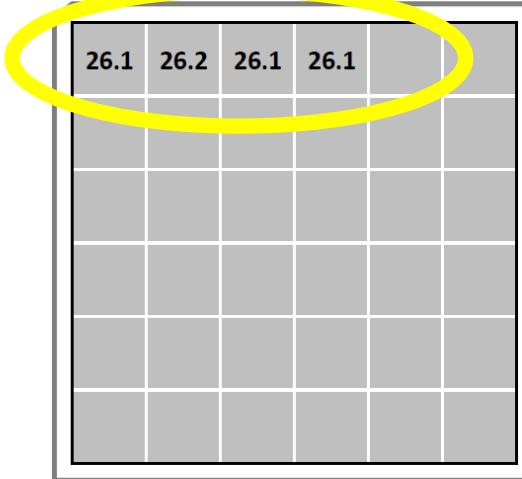
Cells size: 40 μm²

Cells count: 625

Quenching resistance: 800 kΩ

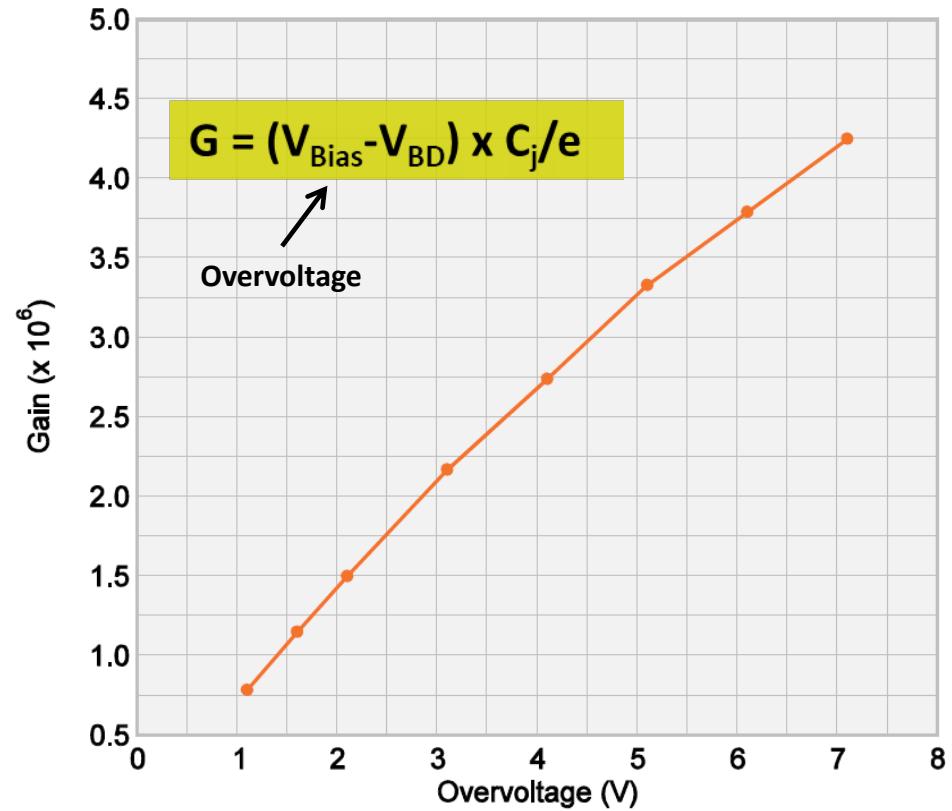
Breakdown voltage at 25 °C
(unit: V)

Box 1



17/07/2019

NUV SiPMs



Breakdown voltage temperature sensitivity: 26 mV/°C
Operating Bias: 2-6 V overvoltage

PO 151 - Delivery note DDT19-056

Geometrical, Electrical, and Optical Typical Characteristics ($T_a = 20^\circ\text{C}$)



Symbol	Parameter	Product			
		ASD-NUV1S-P	ASD-NUV1C-P	ASD-NUV3S-P	ASD-NUV4S-P
AA	Effective active area	1×1 mm ²	1.13 mm ²	3×3 mm ²	4×4 mm ²
N	Cell count	625	673	5520	9340
CS	Cell size (pitch)		40 μm × 40 μm		
FF	Cell fill-factor			60 %	
RQ	Quenching resistance		800 kΩ		
C	Cell capacitance		90 fF		
τ _{RC}	Recharge time constant		70 ns		
S _R	Spectral response range		350 to 900 nm		
λ _p	Peak sensitivity wavelength		420 nm		
PDE	Photon Detection Efficiency ⁽¹⁾			43 %	
BV	Breakdown voltage ⁽²⁾	Typical: 26 V		Min: 24 V	Max: 28 V
σBV	BV standard deviation ⁽³⁾		50 mV		
OV	Recommended Overvoltage range ⁽⁴⁾		Min: 2 V		Max: 6 V
DCR	Dark Count Rate ⁽⁵⁾	< 50 kHz/mm ² @ 2 V OV		< 100 kHz/mm ² @ 6 V OV	
G	Gain ⁽⁶⁾		3.6×10 ⁶		
BVTC	Breakdown Voltage Temperature Coefficient		26 mV/°C		
n _{epoxy}	Refractive index of epoxy resin ⁽⁷⁾		1.5115 (@ 589 nm, 23°C, uncured)		
T _{epoxy}	Spectral transmission of epoxy resin ⁽⁷⁾		> 97% @ 1000 – 1600 nm ; > 99% @ 400 – 1000 nm		

(1) Measured at peak sensitivity wavelength ($\lambda = \lambda_p$) at +6 V overvoltage (not including afterpulse and crosstalk).

REAF

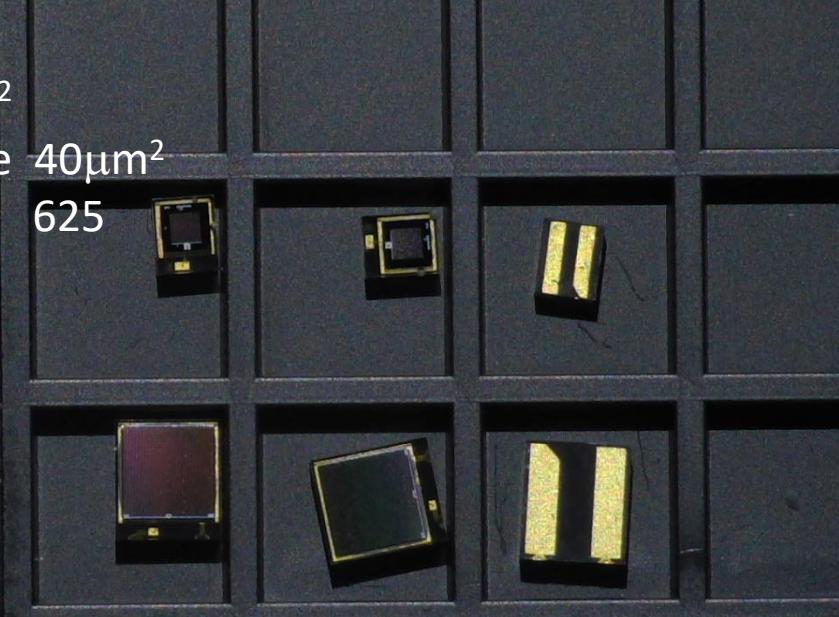
x9.36



1x1 mm²

Cells size 40μm²

N cells 625



3x3 mm²

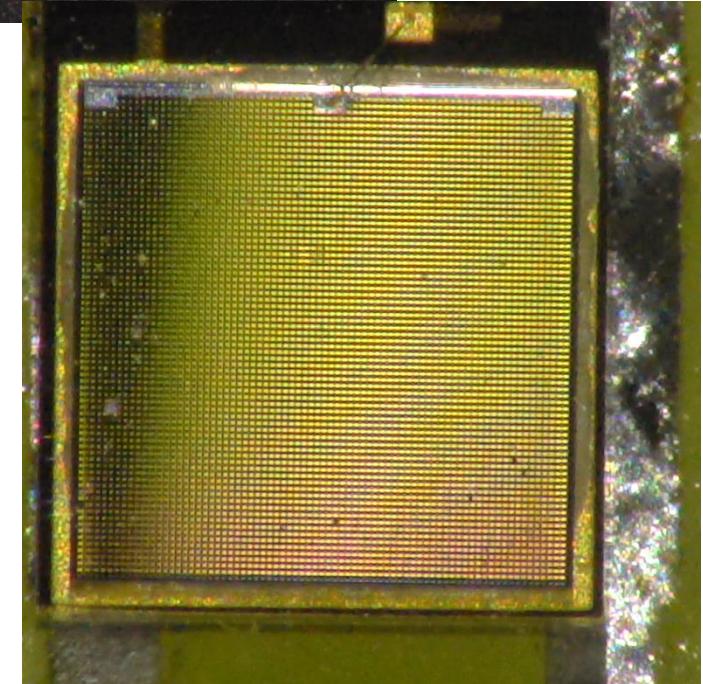
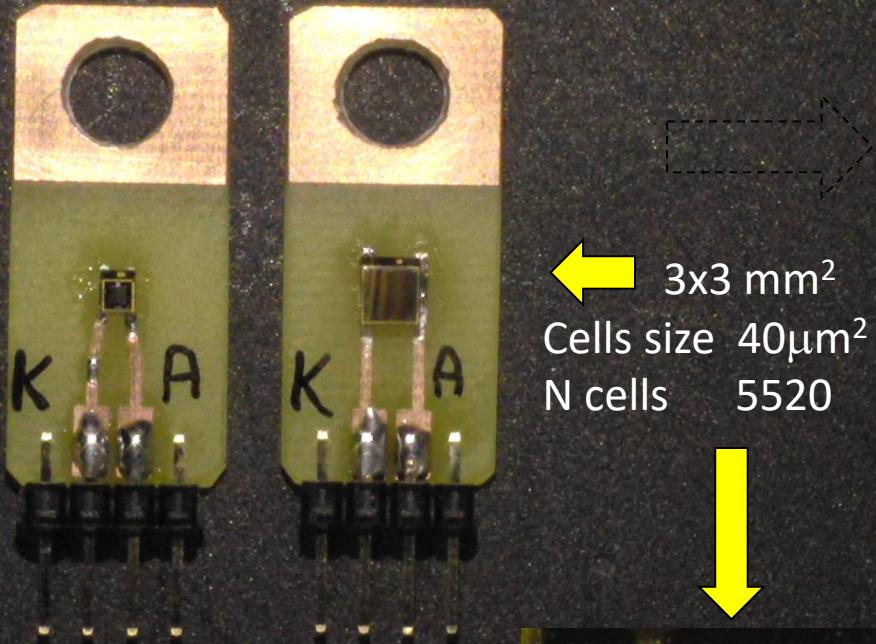
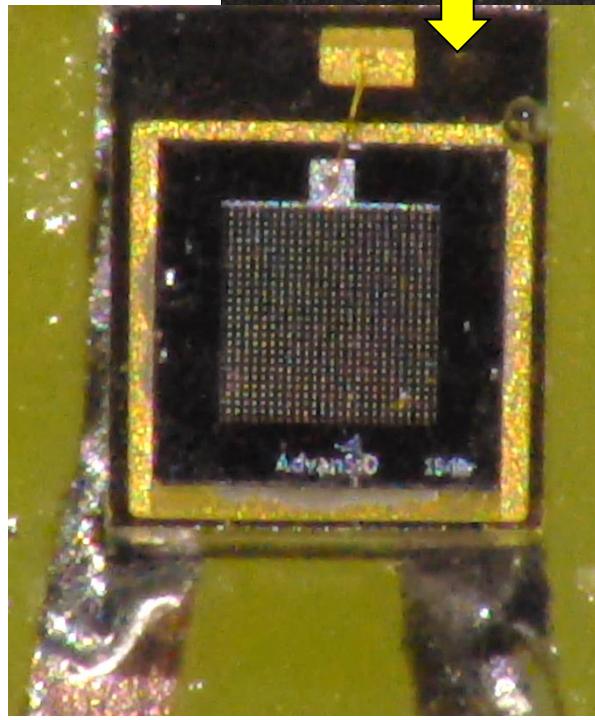
Cells size 40μm²

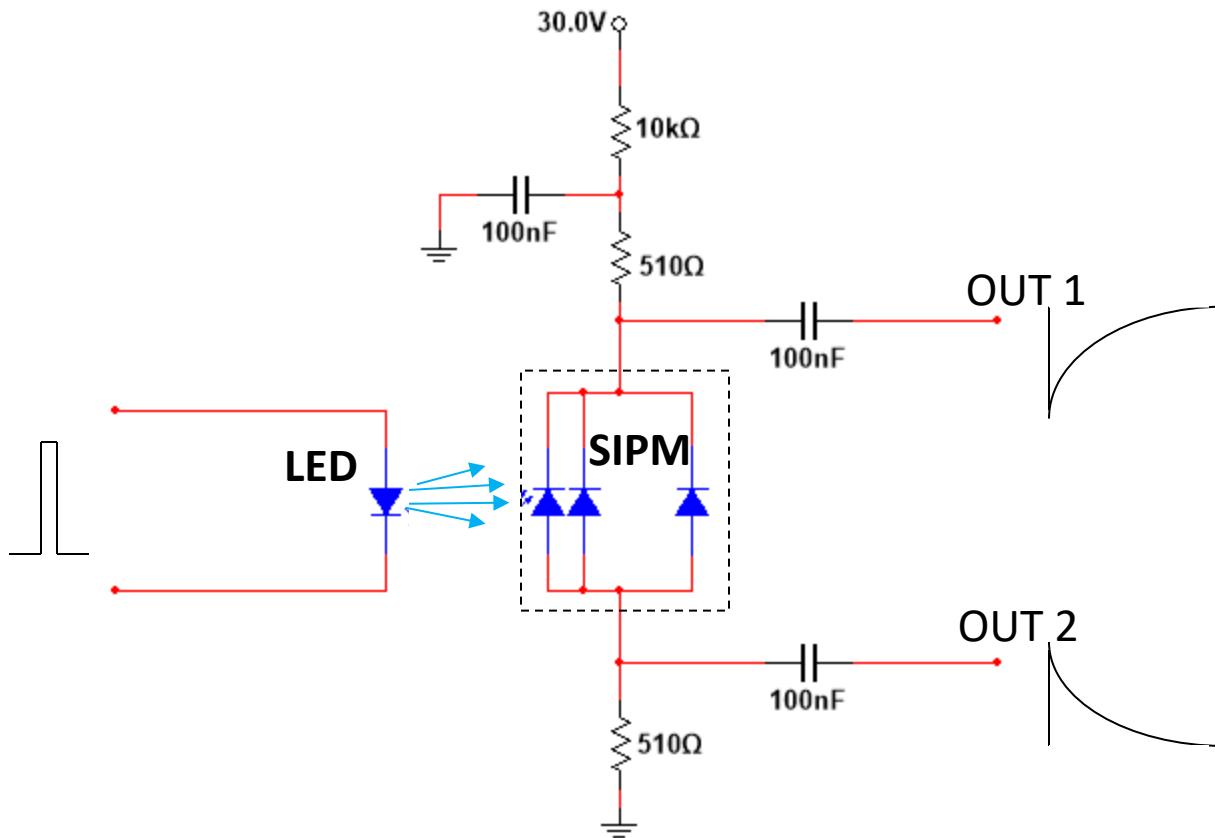
N cells 5520



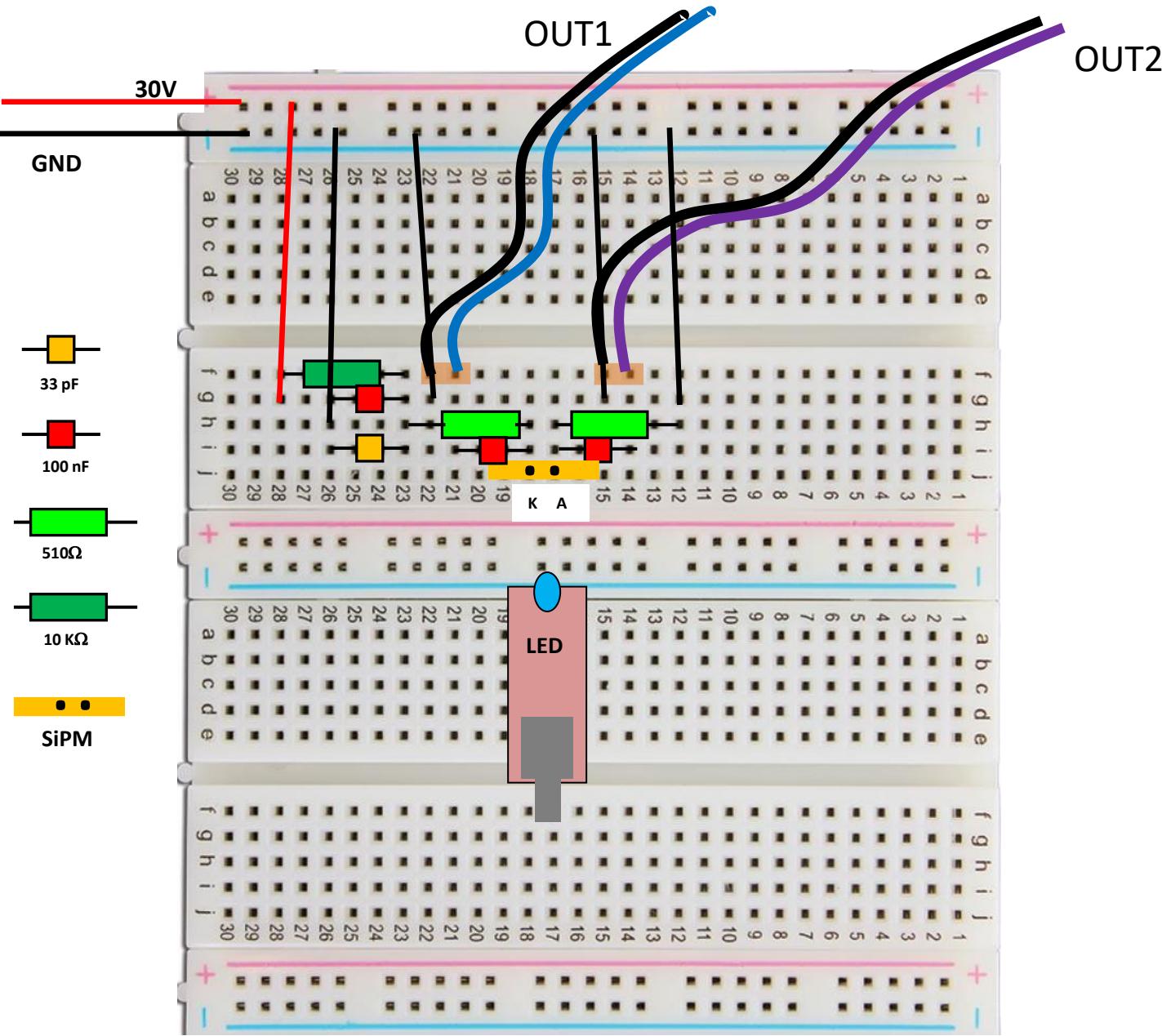
1x1 mm²
Cells size 40μm²
N cells 625

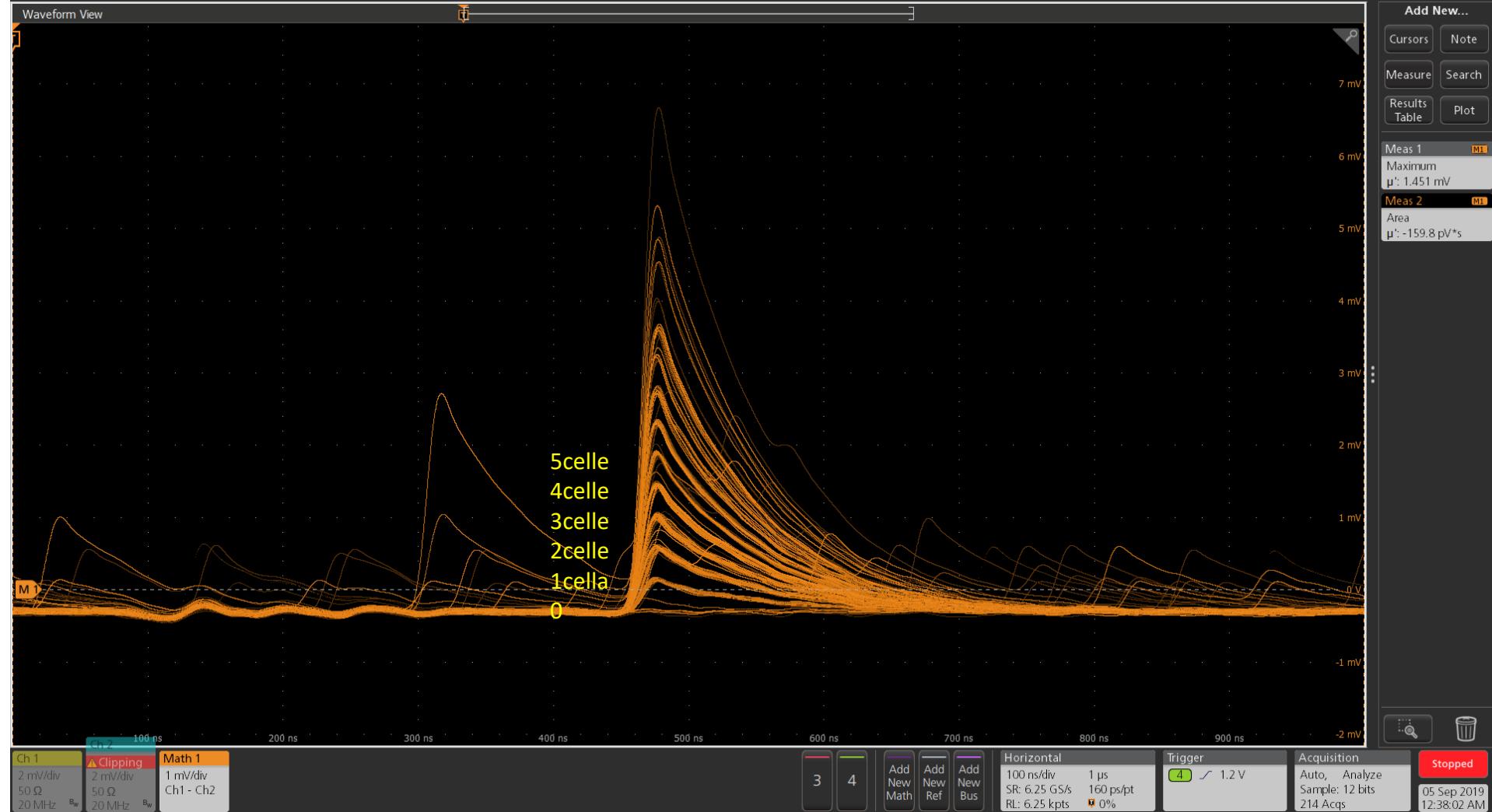
3x3 mm²
Cells size 40μm²
N cells 5520





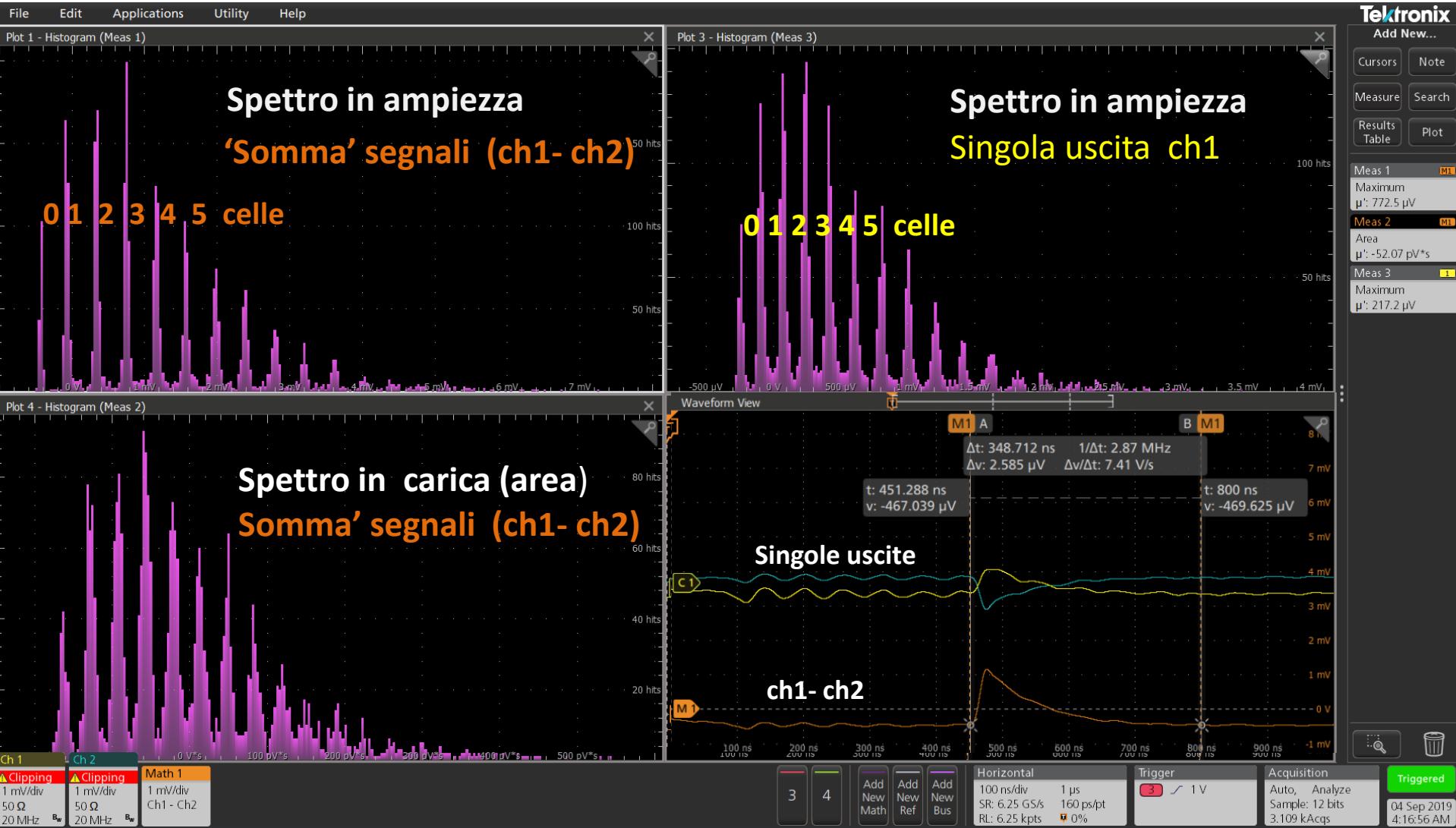
Si possono facilmente ottenere due uscite complementari ed eventualmente fare la sottrazione delle due uscite usando la funzione Math dell'oscilloscopio (si riduce il rumore di modo comune migliorando il rapporto S/N)



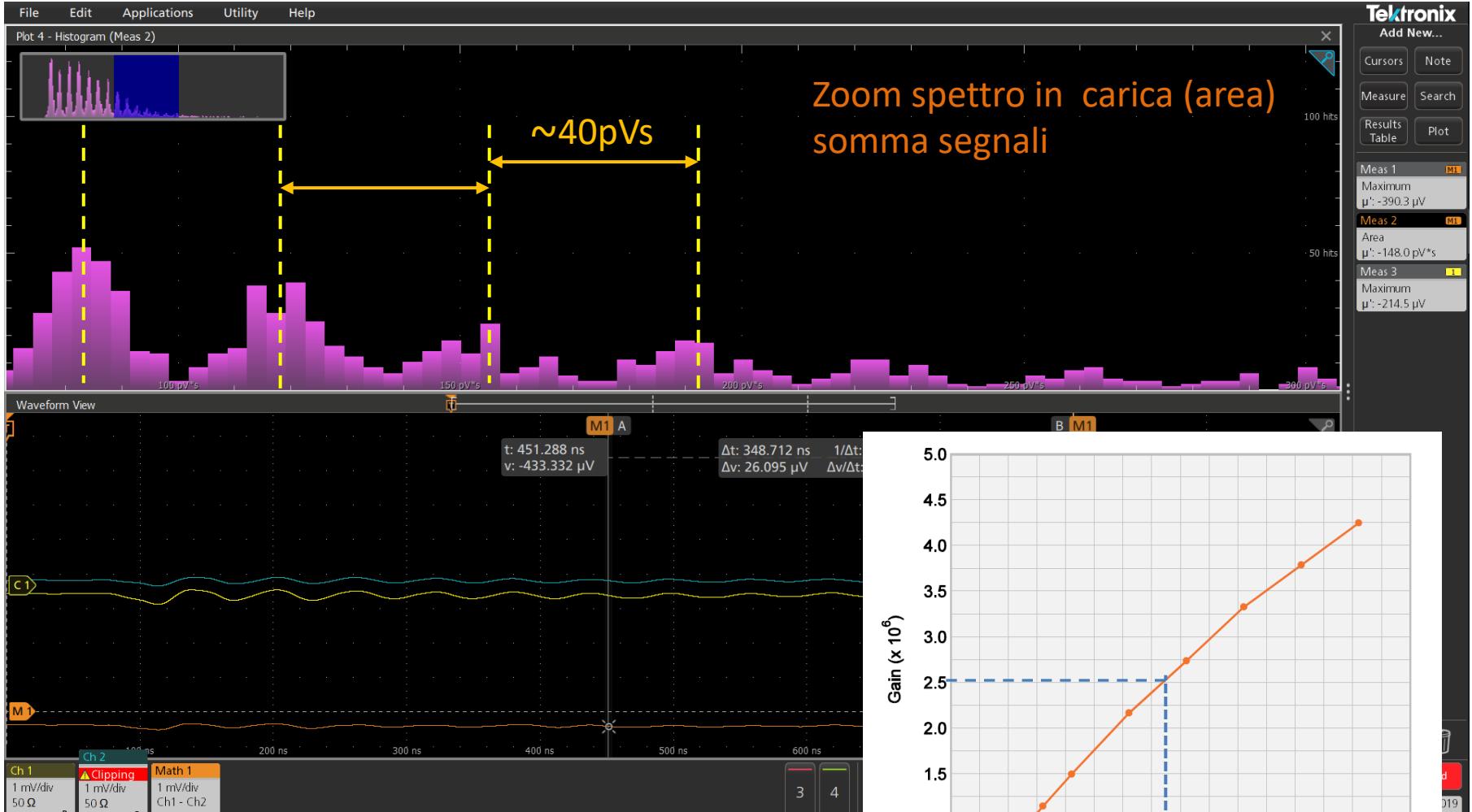


ASD-NUV1S-P 1mm x 1mm

Misure a $V_{bias} = 30V$ (Overvoltage=4V)



Misure a $V_{bias} = 30V$ (Overvoltage=4V)



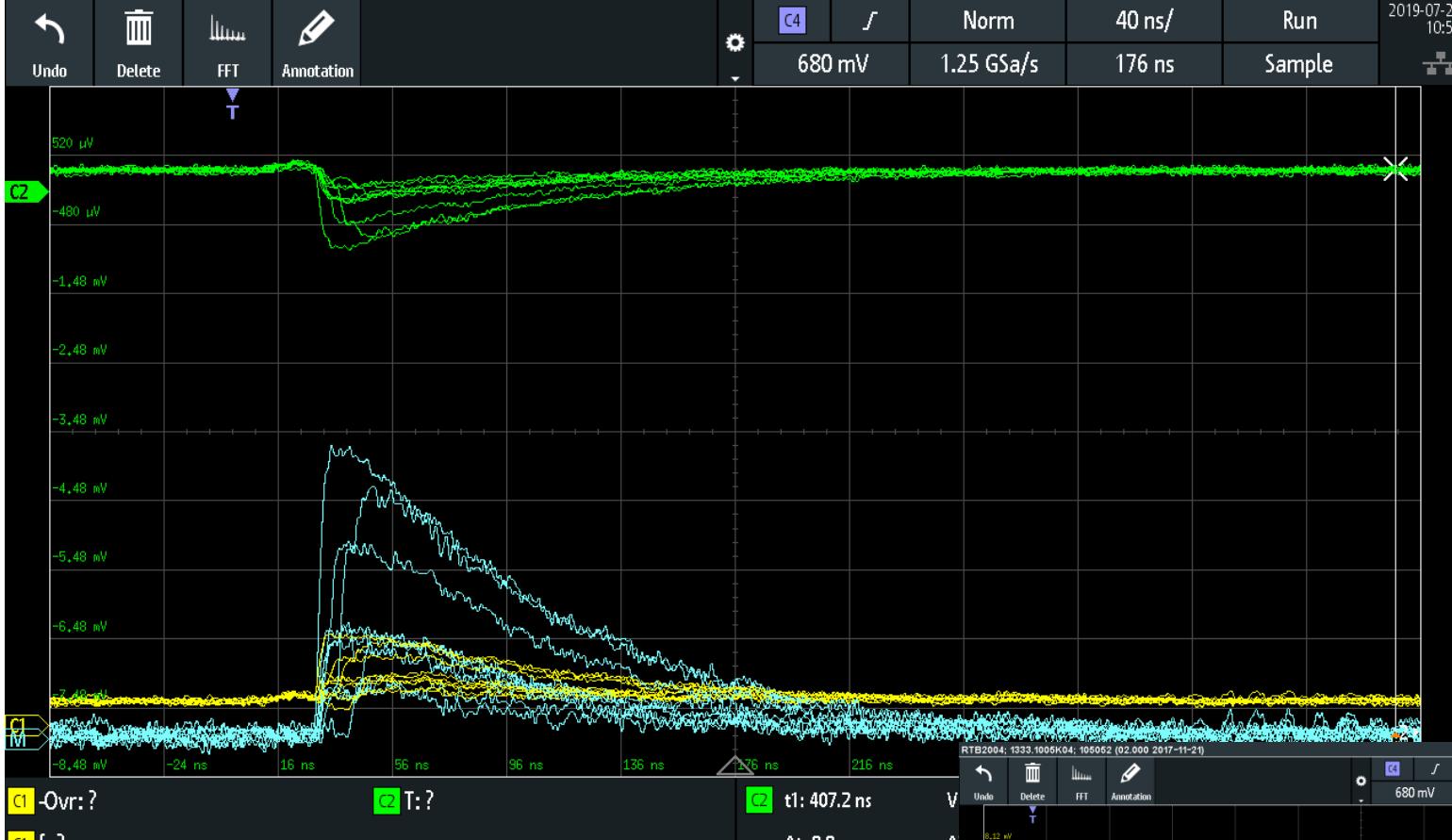
Misure a $V_{bias} = 30V$ (Overvoltage=4V)

$$40 \text{ pVs} / 50 \Omega = 0.8 \text{ pC}$$

$$0.8 \times 10^{-12} / 1.6 \times 10^{-19} = 0.5 \times 10^6$$

Somma segnali

$G \sim 2.5 \times 10^6$



In Laboratorio...

$$\int_{\infty}^0 I e^{-t/\tau} \quad \int_{\infty}^0 -\tau I \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad -\tau I e^{-t/\tau} \Big|_{\infty}^0 = I \tau$$

