



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA  
CORSO DI LAUREA IN FISICA

**Rivelazione di singolo fotone nel vicino infrarosso  
tramite fotodiodi a valanga**

*Laureando:*  
Matteo OSTI

*Relatore:*  
Dott. Gianmaria COLLAZUOL

Anno accademico 2013/2014



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Introduzione su APD ed Elettronica</b>	<b>7</b>
2.1	Principio di funzionamento . . . . .	7
2.2	Parametri caratteristici . . . . .	7
2.2.1	Corrente di buio . . . . .	7
2.2.2	Guadagno . . . . .	8
2.2.3	Efficienza Quantica . . . . .	9
2.3	Catena Elettronica . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Descrizione dell'apparato</b>	<b>13</b>
3.1	APD . . . . .	13
3.2	Elettronica . . . . .	15
3.3	Dewar per misure a freddo . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Caratterizzazione dell'elettronica</b>	<b>17</b>
4.1	Linearità . . . . .	17
4.2	Guadagno e rumore . . . . .	17
4.2.1	Preamplificatore . . . . .	18
4.2.2	Catena completa . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Caratterizzazione dell'APD</b>	<b>23</b>
5.1	Misura della capacità dell'APD . . . . .	23
5.2	Misura del rumore complessivo della catena . . . . .	23
5.3	Corrente di buio . . . . .	25
5.4	Misure di guadagno con LED . . . . .	26
5.5	Misure di guadagno con la sorgente di $^{241}\text{Am}$ . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Conclusioni e lavoro futuro</b>	<b>31</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

Recentemente è stato proposto [1] di sfruttare la fluorescenza dell'aria nel vicino infrarosso per la rivelazione di Ultra-High-Energy Cosmic Rays (*UHECR*). Sono state osservate diverse intense linee di fluorescenza dei costituenti atmosferici, mai sfruttati fin'ora nella rivelazione *UHECR*. In particolare nella regione NIR sono presenti dei picchi di emissione molto intensi, a  $1046nm$  per l'azoto, e a  $1130nm$  per l'ossigeno. Per rivelare tali righe si vuole costruire un sensore composto da una matrice di APD in silicio che, rispetto ai fotodiodi, presentano un guadagno interno elevato permettendo così una maggiore sensibilità a flussi limitati di fotoni.

Per verificare la possibilità di rivelare *UHECR* sfruttando la fluorescenza nella regione NIR si vuole costruire l'apparato con una regione attiva estesa diverse decine di  $cm^2$  con una sensibilità dell'ordine della decina di fotoni per  $cm^2$ , per questa applicazione sono stati scelti APD di larga area ( $1,5 cm^2$ ). Tale apparato servirà da dimostratore per futuri sviluppi di rivelatori più estesi.

Sorgono alcune problematiche legate all'utilizzo di tali APD. Poiché la principale limitazione è dovuta alla band-gap del silicio ( $1,12 eV$ ) che implica un'efficienza quantica (*QE*) pressoché nulla per  $\lambda > 1100 nm$ . Per avere efficienza accettabile (dell'ordine del 20%) alla riga dell'azoto è necessario utilizzare APD con zona attiva più profonda. Questo, unito alla necessità di utilizzare APD di larga area implica un notevole rumore di buio. Per ridurre gli effetti del rumore sarà dunque necessario raffreddare gli APD.

Il lavoro di questa tesi è consistito in uno studio preliminare del sistema costituito da un APD di larga area a temperatura ambiente e criogenica ( $77 K$ ) e dell'elettronica collegata.

La tesi è organizzata come segue: nel Capitolo 2 vengono discusse alcune caratteristiche di APD ed amplificatori di carica, nel Capitolo 3 viene descritto l'apparato su cui sono stati effettuate le misure, nei Capitoli 4 e 5 vengono quindi riportati e discussi i dati ed infine nel Capitolo 6 si traggono le conclusioni.



## Capitolo 2

# Introduzione su APD ed Elettronica

In questo capitolo si introducono i principali elementi da cui è composto l'apparato sperimentale.

### 2.1 Principio di funzionamento

Un APD (Avalanche PhotoDiode) è essenzialmente un fotodiode che sfrutta la moltiplicazione a valanga per produrre un segnale proporzionale alla radiazione incidente molto più intenso di quello di un normale fotodiode, ed è a tutti gli effetti un diode che viene fatto lavorare in condizioni di polarizzazione inversa.

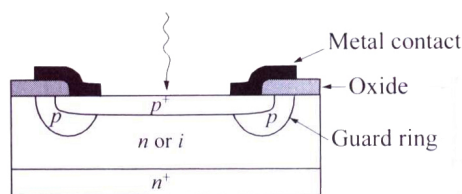


Figura 2.1: Struttura base di un fotodiode a valanga.

Se un APD viene illuminato da fotoni con energia superiore al gap del Silicio ( $1,12 eV$  a temperatura ambiente) all'interno della struttura si producono coppie elettrone-lacuna.

Applicando un'elevata tensione inversa all'interno della giunzione si genera un campo elettrico intenso, dell'ordine di  $10^5 V/cm$ , che accelera i portatori ed acquistano sufficiente energia da produrre coppie elettrone-lacuna tramite ionizzazione per impatto. Le cariche secondarie possono a loro volta produrre altre coppie e così via. Il processo di produzione di coppie, una volta superata la tensione di innesco, procede con andamento esponenziale. Per questo motivo si utilizza il termine di moltiplicazione a valanga (o *avalanche*). La

corrente generata prende il nome di fotocorrente ed è proporzionale al numero di fotoni incidenti (con  $E > E_{gap}$ ).

### 2.2 Parametri caratteristici

Segue una descrizione dei più importanti parametri che determinano il funzionamento di un APD.

#### 2.2.1 Corrente di buio

Un parametro rilevante per quanto riguarda gli APD è la corrente di buio (*dark current*,  $I_{DARK}$ ) ovvero la corrente di misurabile in assenza di illuminazione. In prima approssimazione può essere espressa come:

$$I_{DARK} = I_D + G \cdot I_{MD} \quad (2.1)$$

In cui

- $I_D$  è una corrente di perdita che non scorre nella zona di moltiplicazione (laterale).
- $I_{MD}$  è una corrente interna che interessa la zona di moltiplicazione e per questo è amplificata per il guadagno  $G$ . Aumenta all'aumentare della tensione inversa applicata.

La corrente di buio costituisce un potenziale problema nella rivelazione di piccoli segnali e va dunque minimizzata.

Per misurare la corrente di buio è necessario polarizzare inversamente l'APD con un alimentatore ad alta tensione, per questa e per le prove successive è stato utilizzato un alimentatore *Keithley 640D*. Visto che sul circuito di polarizzazione (come verrà riportato nel Capitolo 3) sono presenti due resistenze in serie all'APD, una da  $20 M\Omega$  ed un'altra da  $22 M\Omega$  presente all'interno del filtro, nel riportare gli andamenti delle grandezze in funzione della tensione di polarizzazione è opportuno andare a correggere tali valori con quelli effettivi ai capi dell'APD.

### 2.2.2 Guadagno

Un parametro fondamentale per un APD è ovviamente il suo guadagno  $G$ . La moltiplicazione di fotoelettroni generati può essere descritta dalla seguente relazione:

$$G_{ph} = \frac{I - I_{MD}}{I_P - I_D} = \left[ 1 - \left( \frac{V_R - IR_S}{V_B} \right)^n \right]^{-1}$$

in cui

- $I$  è la corrente totale moltiplicata
- $I_P$  è la fotocorrente non moltiplicata
- $I_D$  e  $I_{MD}$  sono rispettivamente le correnti di buio moltiplicate e non
- $V_R$  è la tensione inversa applicata
- $V_B$  è la tensione di breakdown
- $R_S$  è la resistenza in serie all'APD

ed  $n$  è una costante dipendente dal materiale semiconduttore, dal profilo di drogaggio e dalla lunghezza d'onda incidente.

Per grandi intensità luminose ( $I_P \gg I_D$ ) si ha che il massimo valore della moltiplicazione è:

$$M_{ph,max} \approx \frac{I}{I_P} = \left[ 1 - \left( \frac{V_R - IR_S}{V_B} \right)^n \right]_{V_R \rightarrow V_B}^{-1} \approx \frac{V_B}{nIR_S}$$

Il processo di moltiplicazione a valanga è di tipo statistico dove ogni coppia elettrone-lacuna generata a una data distanza nella zona di svuotamento è indipendente. Si caratterizzano tali fluttuazioni attraverso un fattore di rumore. Data la natura statistica del meccanismo guadagno, esso è soggetto a fluttuazioni, che si possono caratterizzare attraverso un *fattore di rumore in eccesso*:

$$F(M) = \frac{\langle M^2 \rangle}{\langle M \rangle^2} = \frac{\langle M^2 \rangle}{M^2}$$

In particolare nel caso che i portatori primari che vengono moltiplicati siano degli elettroni allora il fattore di rumore diventa:

$$F = M \left[ 1 - (1 - k) \left( \frac{M - 1}{M} \right)^2 \right] \approx kM + \left( 2 - \frac{1}{M} \right) (1 - k)$$



### 2.2.3 Efficienza Quantica

Un altro importante parametro per la caratterizzazione di un APD è la sua *efficienza quantica*, definita come il numero di coppie prodotte per fotone incidente. Questo parametro ovviamente dipende dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  incidente e dalla struttura del dispositivo. In figura 2.2 è mostrato il profilo di un APD del tipo studiato in questa tesi caratterizzato da una zona attiva particolarmente profonda ( $60\text{ nm}$ ).

Uno dei fattori che determinano l'efficienza quantica per un APD in silicio a una data lunghezza d'onda è la profondità di penetrazione della luce incidente, funzione dello stesso parametro. Ad esempio nel silicio per una  $\lambda$  di  $400\text{ nm}$  si ha una penetrazione di circa  $0,1\text{ }\mu\text{m}$ .

Questi fotoni vengono assorbiti nella regione  $p$  dell'APD profondamente diffuso e si verificano perdite di portatori di carica dovute alla ricombinazione con negli strati superficiali e nella regione neutra d'ingresso. Questo porta alla riduzione dell'efficienza quantica.

Per lunghezze d'onda più elevate (fino a circa  $800\text{ nm}$ ), dove la ricombinazione superficiale è trascurabile. In altre parole la probabilità di ricombinazione dipende dalla distanza media che devono percorrere i portatori attraverso la regione di drift, e tale distanza è funzione della lunghezza d'onda determinata dalla profondità di penetrazione. Con l'ulteriore aumento della lunghezza d'onda, i fotoni incidenti possono convertire anche oltre la giunzione P-N fino a raggiungere la lunghezza d'onda di taglio (cutoff), approssimativamente di  $1100\text{ nm}$ , alla quale i fotoni hanno un'energia minore di quella del band gap del silicio ( $1,12\text{ eV}$  a  $T = 300\text{ K}$ ), e che quindi non vengono in effetti più assorbiti. A questo punto la QE si riduce ad un valore prossimo allo zero. Un'idea di ciò la può dare il grafico riportato in figura 2.3, che riporta i valori di assorbimento per alcuni materiali usati comunemente per fotorivelatori.

Per esempio in tabella 2.1 vengono riportati i valori della profondità di penetrazione teorica e la frazione di fotoni incidenti assorbiti prima del raggiungimento della giunzione P-N dell'APD a  $60\text{ }\mu\text{m}$  attraverso la seguente relazione:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento del silicio per una data lunghezza d'onda,  $x$  è la profondità, e la costante  $I_0$  è l'intensità del fotone incidente. I primi due sono parametri indicativi di dove le cariche vengono generate, il che è molto importante al fine di conoscere come i portatori contribuiscano alla risposta dell'APD.

Un metodo comune per misurare l'efficienza quantica è quello di confrontare la fotocorrente dell'APD a guadagno unitario con quella di un fotodiodo calibrato. Quando il guadagno dell'APD è unitario la variazione della fotocorrente in funzione della lunghezza d'onda è dovuta solamente a variazioni di efficienza quantica.

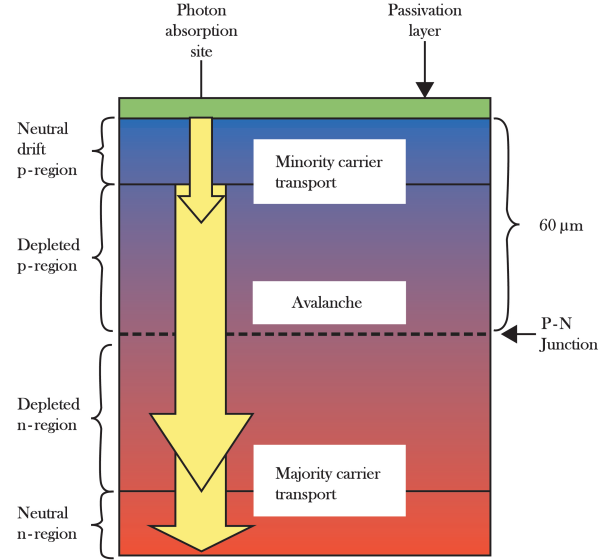


Figura 2.2: Sezione trasversale di un APD che mostra le regioni  $p$  ed  $n$  in presenza di polarizzazione inversa.

È da notare il fatto che questi dispositivi siano molto profondi per massimizzare l'efficienza quantica a grandi  $\lambda$ , e ciò implica inevitabilmente livelli di rumore di buio maggiori.

$\lambda$ (nm)	Profondità di penetrazione ( $\mu m$ )	Assorbimento fotone a $60 \mu m$ (%)
400	0,1	100
500	1,1	100
600	2,6	100
650	4,0	100
700	6,3	100
800	15,7	97,8
900	47,6	71,3
1000	216,1	24,4
1100	2725,5	2,2

Tabella 2.1: Profondità di penetrazione e frazione di fotoni assorbiti nel silicio.

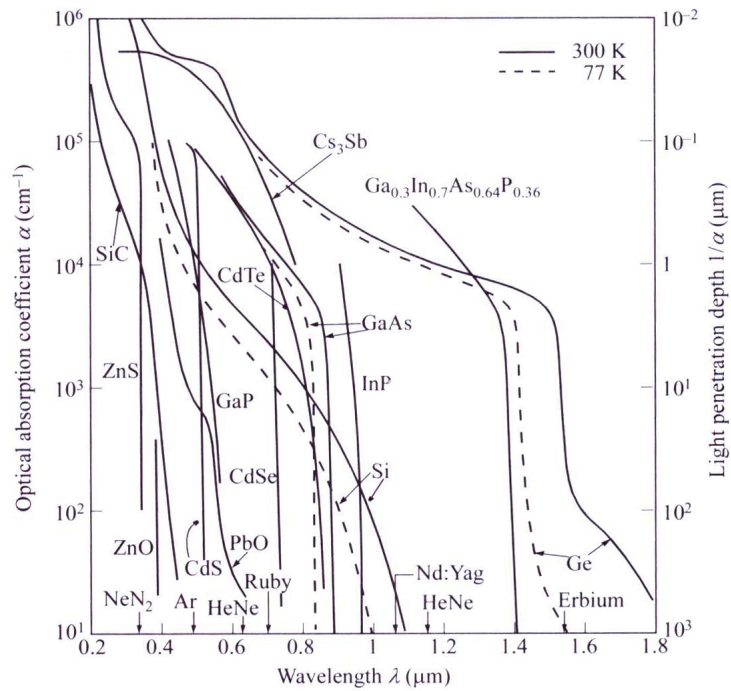


Figura 2.3: Andamento del coefficiente di assorbimento ottico nella zona  $0,2 - 1,8 \mu m$  per vari materiali.

## 2.3 Catena Elettronica

Per quanto riguarda l'elettronica utilizzata nelle misure discusse in questa tesi l'elemento cruciale è un preamplificatore in carica collegato all'APD. L'uscita del preamplificatore viene amplificata da un successivo stadio di shaping, per ottimizzare il rapporto segnale-rumore (S/N).

Il circuito di un generico amplificatore di carica è riportato schematicamente in figura 2.4; questo è costituito da un amplificatore invertente con una resistenza di ingresso elevata. Dal momento in cui è sufficiente considerarne una modellizzazione, si può assumere la resistenza in ingresso infinita e dunque che non ci sia assorbimento di corrente in tale blocco.

Tra il terminale di ingresso e quello di uscita è inserita una capacità di feedback. Quando in ingresso viene applicata una tensione  $v_i$  in uscita si ha  $v_o = -Av_i$ . La differenza di potenziale ai capi della capacità di feedback è  $v_f = (A + 1)v_i$  e quindi la carica depositata sarà  $Q_f = C_f(A + 1)v_i$ . Si può esprimere il valore della capacità di ingresso come:

$$C_i = \frac{Q_i}{v_i} = C_f(A + 1)$$

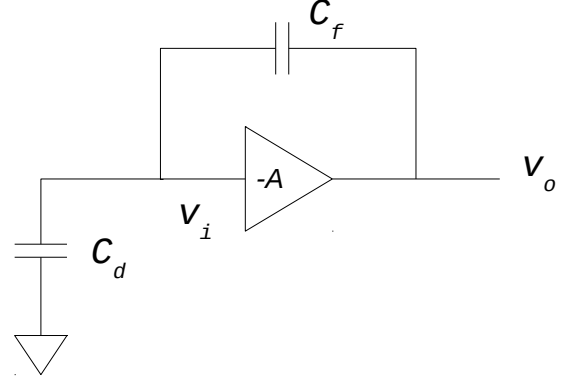


Figura 2.4: Schema generale di un preamplificatore in carica

Si può definire quindi un guadagno, in termini dell'output in tensione per unità di carica:

$$A_Q = \frac{v_o}{Q_i} = \frac{Av_i}{C_i v_i} = \frac{A}{C_i} = \frac{A}{A + 1} \frac{1}{C_f} \approx \frac{1}{C_f}$$

nell'ipotesi in cui  $A \gg 1$ .

In questo tipo di amplificatori il segnale prodotto è, in prima approssimazione (se  $C_i \gg C_d$ ), indipendente dalla capacità del rivelatore (l'APD nel caso in esame).

Il rumore in uscita è rimandato in ingresso attraverso il feedback con fase opposta, diminuendo dunque il rumore rispetto a quello ad anello aperto  $e_{no} = A_v e_{ni}$ .

Nel caso in cui l'output proveniente dal preamplificatore venga passato ad uno shaping amplifier con banda  $\Delta f$  si ha che il rumore di carica, se le correnti di buio sono trascurabili, vale:

$$Q_{ni} = F_S \frac{e_{no}}{A_Q} = F_S \frac{e_{no}}{C_f} = F_S e_{ni} (C_f + C_d) \approx F_S e_n (C_f + C_d)$$

con  $F_S = A_{VS} \sqrt{\Delta f}$ ,  $e_{no}$  è il rumore in output al dispositivo,  $e_{ni}$  è quello in input al blocco di amplificazione, ed  $e_n$  il rumore in tensione prodotto dal rivelatore.

Quindi ci si aspetta che il rapporto segnale-rumore sia:

$$\frac{Q_s}{Q_{ni}} = \frac{1}{F_S} \frac{Q_s}{e_n (C_d + C_f)} \approx \frac{1}{F_S} \frac{1}{C_d} \frac{Q_s}{e_n} \quad (2.2)$$

che vale nel caso in cui  $C_d \gg C_f$ .

In generale si può dimostrare che il rumore equivalente della catena di elettronica si può scrivere come [2]

$$Q_n^2 = i_n^2 F_i \tau + e_n^2 F_v \frac{C^2}{\tau} + F_{vf} A_f C^2 \quad (2.3)$$

in cui  $\tau$  è la costante di tempo dello shaper e  $C$  è la somma di tutte le capacità in parallelo sull'ingresso;  $F_i$ ,  $F_v$  e  $F_{vf}$  sono determinati dalla risposta dello shaper.

Relativamente all'equazione 2.3 i primi due termini rappresentano rispettivamente i rumori in corrente ed in tensione, mentre il terzo termine rappresenta il rumore  $1/f$ .

Considerando la catena completa bisogna includere le sorgenti di rumore dovute alla presenza dell'APD. in particolare si devono considerare la corrente di buio e le sue fluttuazioni, nonché le fluttuazioni di guadagno dell'APD. La (2.3) diventa quindi:

$$Q_n^2 = i_n^2 F_i \tau + e_n^2 F_v \frac{C^2}{\tau} + F_{vf} A_f C^2 + G^2 (q_e I_{dg} F_i \tau + \sigma_s^2) + \sigma_G^2 (I_{dg}^2 F_{i2} \tau + Q_s^2) \quad (2.4)$$

che può venire riscritta in una forma del tipo:

$$\alpha_1 \tau + \frac{\alpha_2}{\tau} + \alpha_3$$

Dove

- $\alpha_1$  rappresenta il rumore in corrente, lineare rispetto a  $\tau$ , ed include anche il contributo di rumore in eccesso
- $\alpha_2$  rappresenta il rumore in tensione e contribuisce in modo proporzionale alla capacità
- $\alpha_3$  rappresenta il rumore  $1/f$ , che rispetto agli altri due contributi è normalmente trascurabile

in figura 2.5 è illustrato l'andamento del rumore equivalente in funzione del tempo caratteristico  $\tau$ .

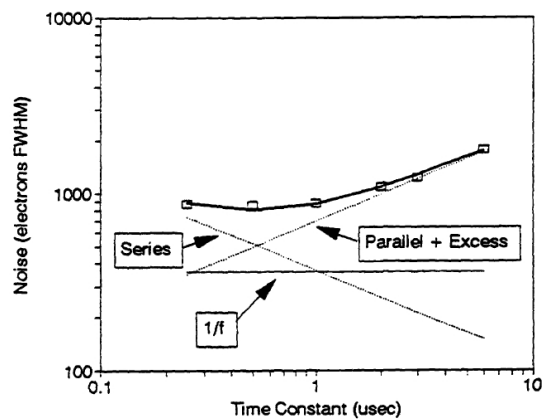
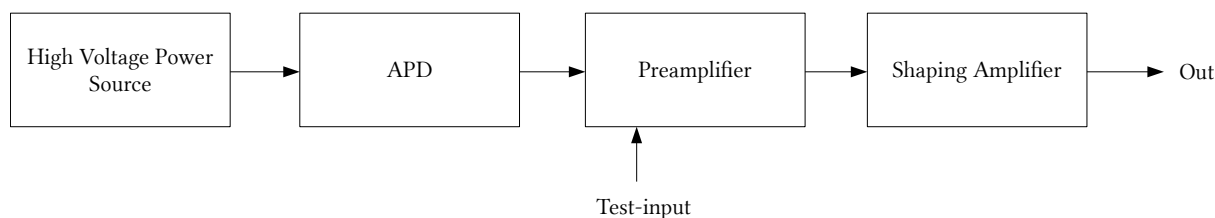


Figura 2.5: Andamento generale del rumore in un APD in funzione dello shaping time  $\tau$  [?].

## Capitolo 3

# Descrizione dell'apparato

L'apparato che abbiamo caratterizzato è composto da un APD, dal relativo sistema di polarizzazione, da un preamplificatore di carica e da uno shamping amplifier.



Le misure sono state effettuate utilizzando i seguenti strumenti:

- multicanale *Amptek MCA 8000A*
- elettrometro *Keithley 6514*
- voltmetro RMS *HP 3400B*
- oscilloscopio *Tektronix TDS540C*

Per produrre l'input di test è stato utilizzato un generatore di funzioni *HP 8116A* ed un attenuatore *HP355D*.

### 3.1 APD

L'apparato di rivelazione è composto da un APD *RMD S1315*, con un'area attiva di  $13\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ , dal relativo circuito di polarizzazione e da un alimentatore di alta tensione *Keithley 640D*.

Le caratteristiche dell'APD utilizzato sono riportate in tabella 3.1 mentre circuito utilizzato per la polarizzazione dell'APD è rappresentato in figura 3.1.

Disturbi verificatisi durante l'esecuzione delle prove hanno reso necessario l'utilizzo di un filtro, rappresentato in figura 3.2, sul lato dell'alta tensione. In particolare è stato importante utilizzare l'induttore per attenuare notevoli disturbi sulla linea di massa.

Parameter	Typical Value at 22°C
Gain (at optimal signal-to-noise ratio)	300 to 2000
Capacitance	0,7 pf/mm <sup>2</sup>
Bias voltage (at optimal signal to noise ratio)	1650V to 1750V
QE at 400 nm	50%
QE at 532 nm	65%
QE at 830 to 905 nm	75%
QE at 1064 nm	20%
Nominal Active Area	169 mm <sup>2</sup>
Rise Time for a charged particle	≤ 1 ns
Rise Time at 532 nm	10 ns
Rise Time at 1064 nm	< 2 ns
Noise Equivalent Power, rms	85 fW/Hz <sup>1/2</sup>
Noise, FWHM	900 eV

Tabella 3.1: Caratteristiche dell'APD utilizzato.

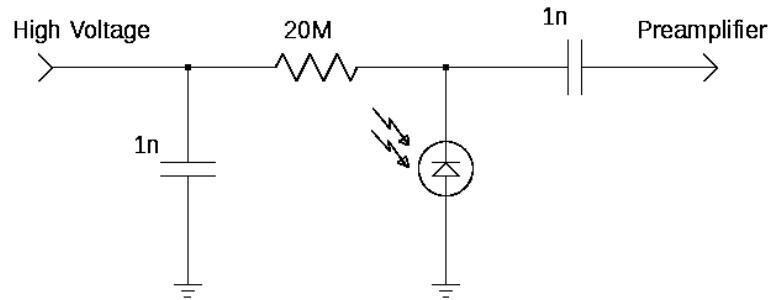


Figura 3.1: Circuito di polarizzazione dell'APD.

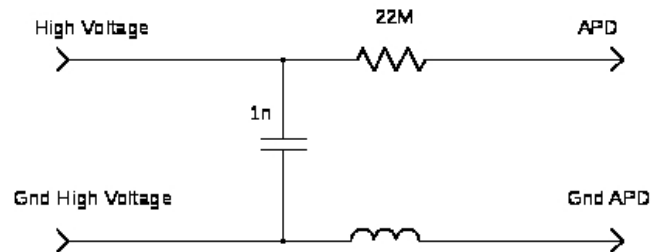


Figura 3.2: Filtro utilizzato sul lato HV.

## 3.2 Elettronica

All'uscita del rivelatore viene collegata la catena elettronica per la misura dei segnali rilevati dall'APD, che è essenzialmente composta da un preamplificatore di carica e da uno shaping amplifier.

Il preamplificatore utilizzato è un *NAICAM CB200C*. Esso dispone di un terminale di test con una capacità in ingresso di  $3,3\text{ pF}$  ed un'amplificazione a vuoto di  $3\text{ mV/fC}$ . Attraverso l'applicazione di una tensione  $V$  a gradino si carica il condensatore con una carica pari a  $Q = CV$ , in questo modo si riesce a quantificare la carica iniettata nel preamplificatore. Attraverso tale relazione è possibile calcolare il guadagno di questo stadio in funzione della carica in ingresso. Per ottenere il numero di elettroni equivalenti in ingresso si deve moltiplicare il valore di  $Q$ , espresso in  $fC$ , per un fattore 6250 ( $10^{-15}/e$ ).

Lo shaping amplifier adoperato è un *Silena Mod. 7611* (semi-gaussian pulse shaping) con un gain compreso tra 2,5 e 1500 e con tempi di integrazione di  $0,25\mu\text{s}$ ,  $0,5\mu\text{s}$ ,  $1\mu\text{s}$ ,  $2\mu\text{s}$ ,  $3\mu\text{s}$  o  $6\mu\text{s}$ .

## 3.3 Dewar per misure a freddo

Per raffreddare l'APD è stato utilizzato un dewar, rappresentato in figura 3.3, dove il rivelatore è messo in contatto con l'estremità di un dito freddo in rame, immerso all'altro capo in un bagno di liquidi criogenici ( $LN_2$  nel caso specifico).

Per evitare la deposizione di vapori e gas condensati sulla superficie dell'APD, è necessario fare il vuoto nel contenitore (nell'ordine di  $10^{-5}\text{ mbar}$ ).

Per la misura ed il controllo della temperatura è stata utilizzata una termoresistenza *PT100*, posta a diretto contatto con l'APD.

In corrispondenza della zona attiva del rivelatore, il contenitore è dotato di una finestrella in quarzo che permette la trasmissione di luce all'APD.

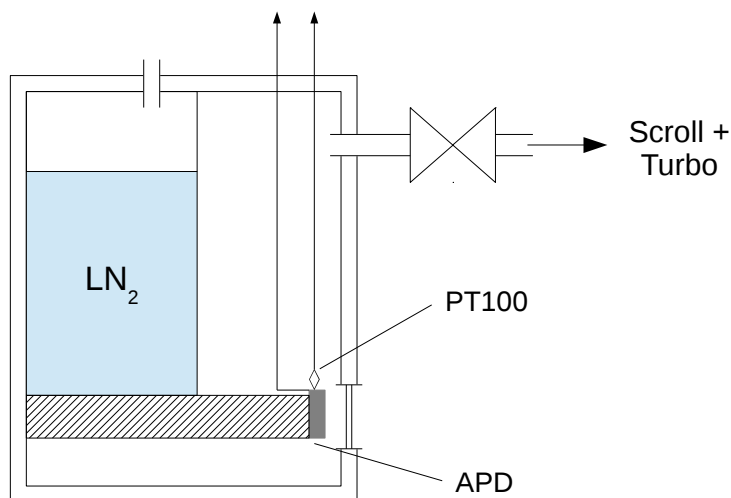


Figura 3.3: Schema del dewar.





## Capitolo 4

# Caratterizzazione dell'elettronica

Il primo obiettivo delle misure è stata la caratterizzazione del guadagno e del rumore dell'elettronica di lettura dell'APD in termini di guadagno e di rumore.

### 4.1 Linearità

La prima verifica da effettuare riguarda la linearità della catena di elettronica. Per misurare la risposta abbiamo iniettato sull'ingresso di test del preamplificatore un gradino di tensione nota (equivalente ad una determinata carica in ingresso) e abbiamo misurato l'ampiezza in uscita dai due componenti in esame.

Viene riportata in figura 4.1 la misura di linearità della catena in funzione della carica in input al preamplificatore, effettuate utilizzando un tempo di shaping di  $2 \mu s$ .

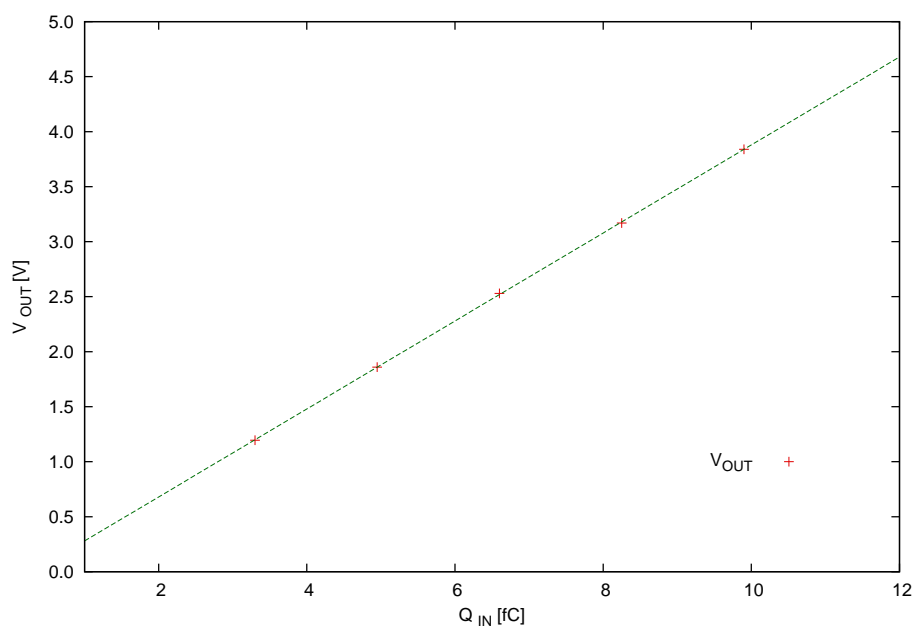


Figura 4.1: Linearità della catena di elettronica.

### 4.2 Guadagno e rumore

Poiché al variare della tensione di polarizzazione inversa sull'APD la capacità di giunzione cambia, è necessario effettuare delle misure di guadagno e di rumore del solo preamplificatore, e poi di tutta la catena,

al variare della capacità di ingresso del preamplificatore. Ciò è stato effettuato ponendo dei condensatori (opportunamente schermati) di valore noto ai capi dei terminali di input, simulando il comportamento capacitivo del rivelatore.

Per le misure di rumore abbiamo misurato l'rms lasciando scollegato il terminale di test del preamplificatore. Le misure di rumore sono state effettuate utilizzando un Voltmetro RMS *HP 3400B*, che sfrutta una termocoppia per misurare la relativa densità spettrale di potenza (PSD). I segnali di input e in uscita sia dallo shaper sia dal preamplificatore sono stati misurati tramite un oscilloscopio (*Tektronix TDS 540C*).

### 4.2.1 Preamplificatore

Vediamo innanzitutto come si comporta il preamplificatore al variare della capacità di ingresso. I valori di  $C_{IN}$  riportati si riferiscono a quantità aggiunte all'apparato già esistente, senza contare le capacità parassite principalmente dovute ai cavi ( $\sim 20\text{ pF}/m$ ), non trascurabili rispetto ai valori di capacità più bassi. Come si vede in figura 4.2 sia il guadagno sia il rumore equivalente hanno un andamento pressoché lineare con la capacità di ingresso.

Gli andamenti così ottenuti sono riportati in figura 4.2.

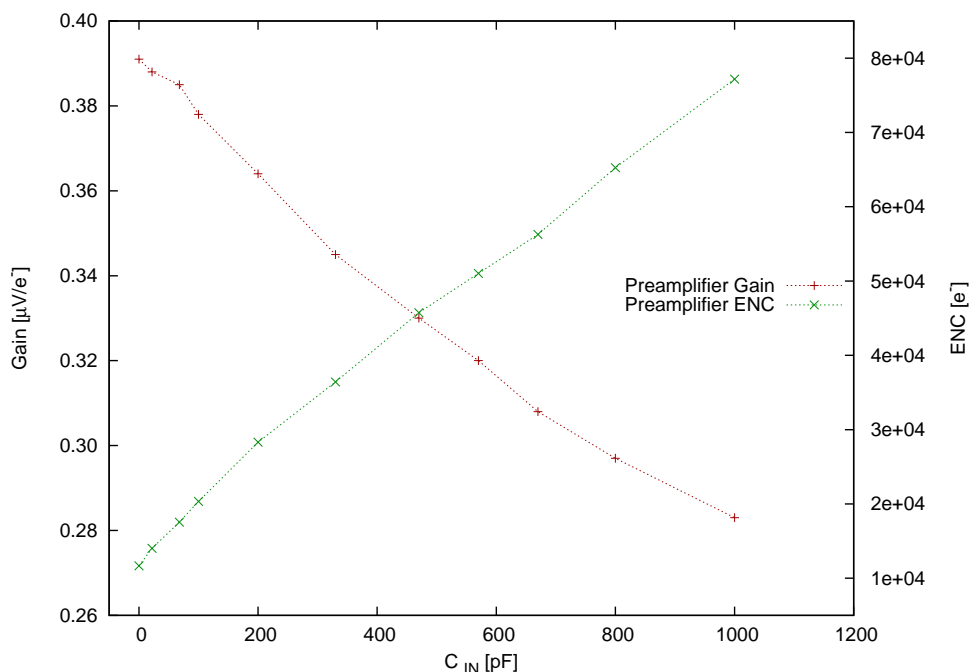


Figura 4.2: Guadagno e rumore equivalente in funzione della capacità di ingresso.

Si osserva che sia il guadagno sia il rumore equivalente hanno un andamento pressoché lineare al variare della capacità di ingresso.

### 4.2.2 Catena completa

Le stesse misure sono state effettuate sulla catena completa al variare della capacità e dello shaping time  $\tau$  per valutare l'effetto dello shaping sul rumore. I relativi grafici sono riportati nelle figure 4.3 e 4.4.

In figura 4.5 viene riportato l'andamento dell'inverso del rapporto segnale-rumore in funzione della capacità. Da quanto riportato nell'equazione (2.2) dovrebbe risultare una relazione lineare nel caso in cui la capacità del rivelatore sia molto maggiore di quella di feedback ( $C_{IN}$  elevate).

Viene verificato, per un valore di capacità di  $200\text{ pf}$ , il comportamento del rumore equivalente in funzione

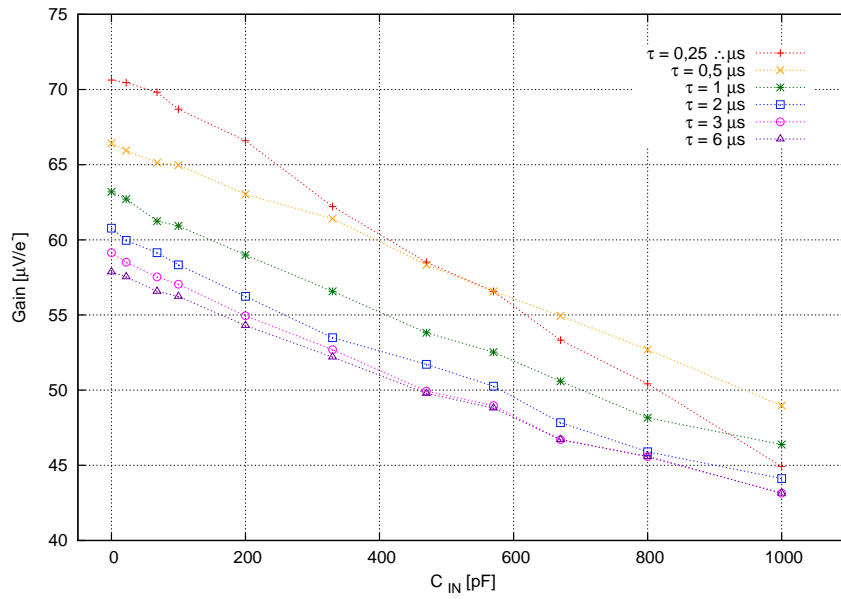


Figura 4.3: Guadagno complessivo della catena al variare della capacità di ingresso e dello shaping time  $\tau$ .

dello shaping time. Ci si aspetta infatti che si comporti analogamente a quanto riportato in figura 2.5. Si vede quindi dalla figura 4.6 che l'effetto dominante è dato dal rumore in tensione dell'apparato.

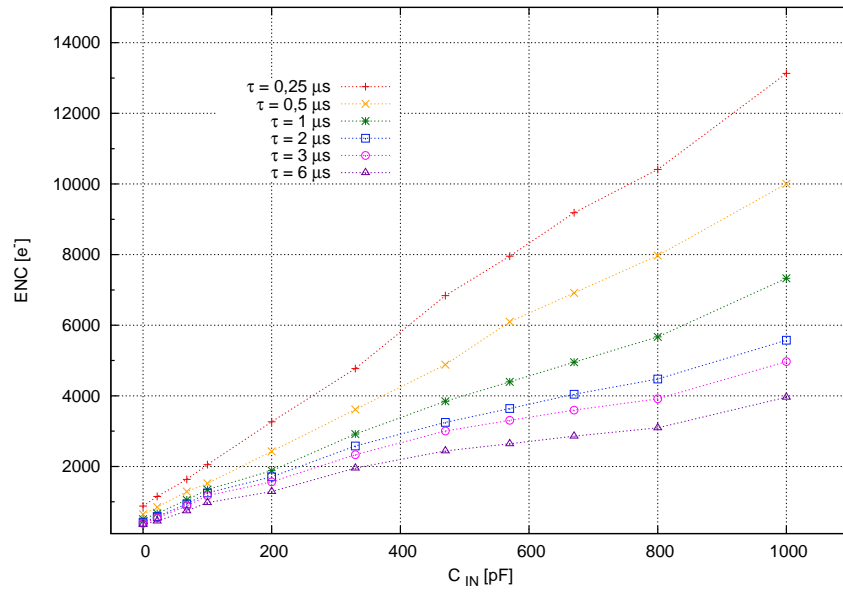


Figura 4.4: Rumore equivalente della catena al variare della capacità di ingresso e dello shaping time  $\tau$ .

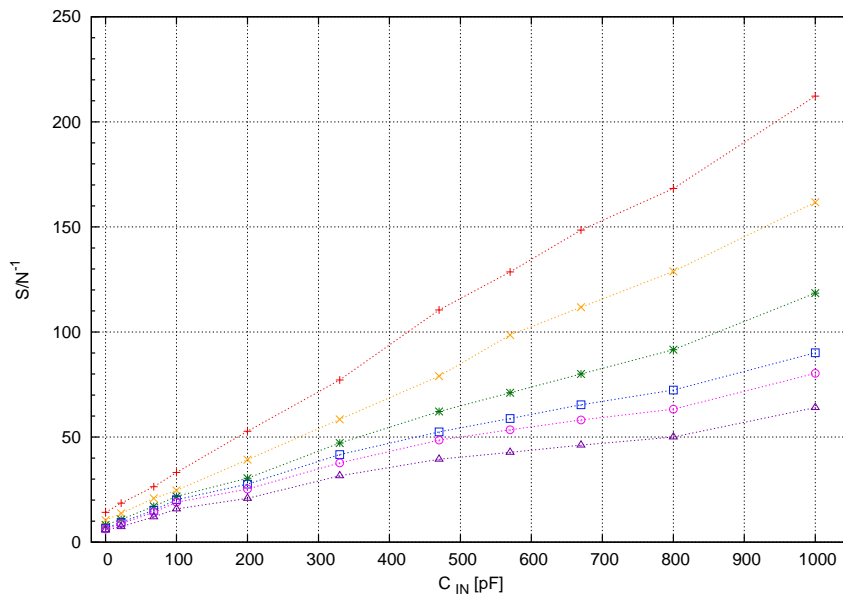


Figura 4.5:  $S/N^{-1}$  al variare della capacità di ingresso e dello shaping time  $\tau$ .

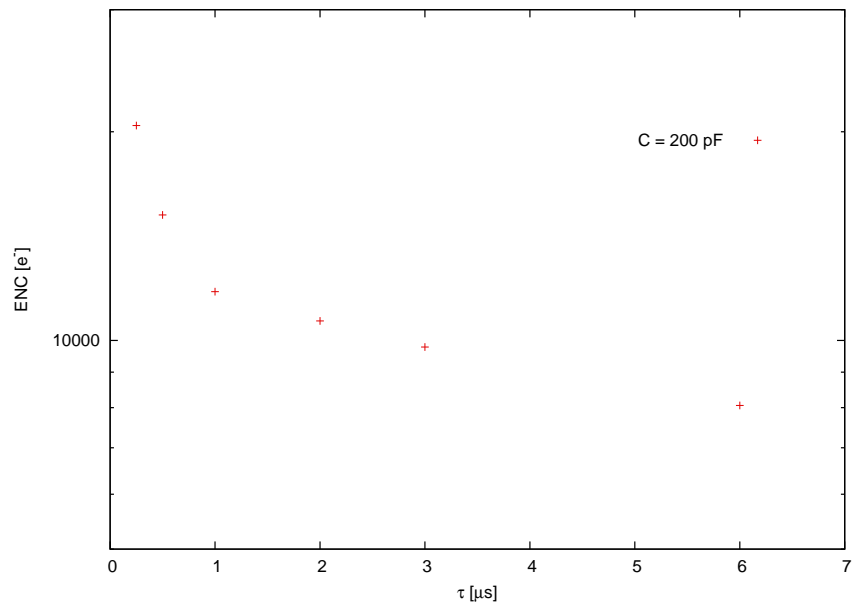


Figura 4.6: Rumore equivalente complessivo al variare dello shaping time  $\tau$ .



# Capitolo 5

## Caratterizzazione dell'APD

In questo capitolo vengono discusse le misure di caratterizzazione dell'APD connesso alla catena elettronica. In particolare si sono studiate la capacità, la corrente di buio, il rumore complessivo ed il guadagno del sistema.

### 5.1 Misura della capacità dell'APD

Prima di studiare il rumore prodotto dalla catena completa è utile misurare la capacità dell'apparato. Per fare ciò si è proceduto come segue: partendo dal circuito di rivelazione e polarizzando l'APD si è posto un resistore in serie all'apparato, sull'uscita destinata al preamplificatore, alimentando il circuito con un'onda sinusoidale di frequenza nota si è andati a misurare la tensione tra massa ed il punto tra la capacità di disaccoppiamento del rivelatore ed il resistore in questione.

Essendo nota la funzione di trasferimento del circuito si è risaliti alla capacità dell'APD.

Tali risultati sono consistenti con quanto ottenuto andando a misurare la tensione a buio del test-in e confrontandola con i valori di amplificazione e risposta della catena elettronica.

I valori così ottenuti (senza considerare offset dovuti a capacità parassite) sono consistenti con quanto riportato sul datasheet dell'APD.

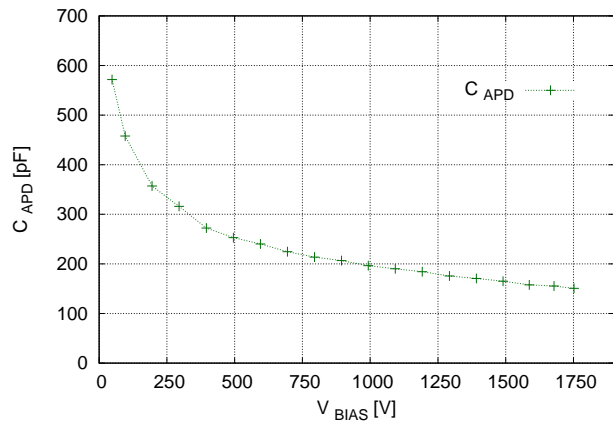


Figura 5.1: Capacità dell'APD in funzione della tensione di polarizzazione.

### 5.2 Misura del rumore complessivo della catena

Il rumore complessivo dell'apparato è stato misurato in modo analogo a quanto discusso al Capitolo 4 per la sola elettronica. Tale grandezza è stata misurata attraverso l'utilizzo del multicanale: iniettando nell'ingresso di test del preamplificatore un gradino di tensione noto si è andati a misurare la larghezza del picco registrato in uscita dallo shaper. Il rumore viene quindi quantificato come la larghezza (in deviazioni standard) dei picchi di tale segnale.

Per confronto è stato misurato il rumore, sempre al variare di  $V_{BIAS}$  e  $\tau$ , anche con il voltmetro RMS, ma solamente per valori di  $V_{BIAS}$  inferiori a 1000 V a causa di alcuni eventi di moltiplicazione molto grandi che venivano rilevati dall'APD che non permettevano una misura affidabile di tale grandezza.

Si può vedere (figura 5.2) che per piccoli valori di  $V_{BIAS}$ , dove la capacità dell'APD è più elevata, domina il fattore di rumore in tensione, che diminuisce insieme alla capacità (aumentando  $V_{BIAS}$ ). Per alti valori di tensione di polarizzazione si vede che domina l'effetto del rumore in corrente dell'APD (rumore di

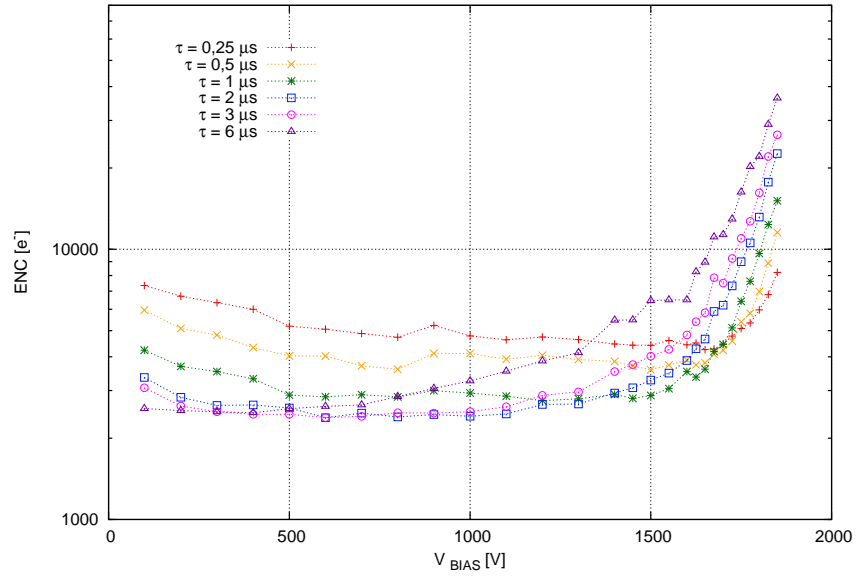


Figura 5.2: Rumore complessivo dell'apparato in funzione della tensione di polarizzazione.

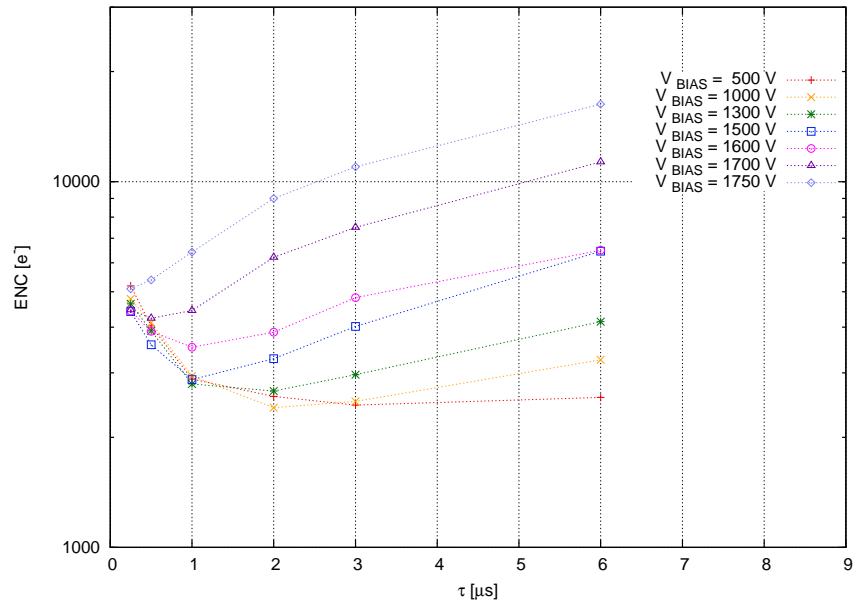


Figura 5.3: Rumore della catena in funzione del tempo di shaping  $\tau$ .



buio e moltiplicazione dell'APD). La figura 5.3 rappresenta il rumore dell'apparato, per diversi valori di tensione, al variare dello shaping time. Il comportamento rappresentato è quindi confrontabile con l'espressione (2.5). Si osserva dunque che per valori di elevato guadagno è meglio utilizzare shaping con tempi piccoli.

### 5.3 Corrente di buio

Parametro cruciale dell'APD per l'applicazione di interesse è la corrente di buio, che è stata misurata leggendo la corrente in serie all'APD, polarizzato con un generatore di alta tensione *Keithley 640D*, tramite l'elettrometro *Keithley 6514*, avendo oscurato il rivelatore.

Nel riportare i prossimi grafici si indica la tensione effettiva ai capi dell'APD ( $V_{eff}$ ), che viene calcolata sottraendo alla tensione  $V_{BIAS}$  impostata, la caduta sulle resistenze in serie all'APD:

$$V_{eff} = V_{BIAS} - IR_S$$

Le misure sono state fatte sia a temperatura ambiente ( $300K$ ) sia a  $77K$  ( $LN_2$ ). Dal grafico che rappresenta la corrente di buio in funzione di  $V_{BIAS}$  (figura 5.4) a due diverse temperature si può notare che quando ci si trova a guadagni bassi tale quantità differisce di quattro ordini di grandezza: si nota in effetti che le misure sono consistenti con il rumore di generazione-ricombinazione, che diminuisce di circa un fattore 2 ogni  $10K$ .

Si osserva inoltre che il ginocchio della curva della corrente di buio è anch'esso dipendente dalla temperatura, in particolare si sposta progressivamente verso valori più bassi al variare della temperatura [3]. Ciò è dovuto all'aumento della mobilità nel Silicio alle basse temperature: a parità di tensione di bias, ovvero di campi elettrici interni, a temperature più basse i portatori raggiungono maggiori accelerazioni e dunque si ottengono guadagni più elevati. Dal grafico in figura 5.5, preso a  $V_{BIAS}$  costante, si può vedere l'andamento della corrente di buio in funzione della resistenza della *PT100*, proporzionale a sua volta alla temperatura (a meno di un offset).

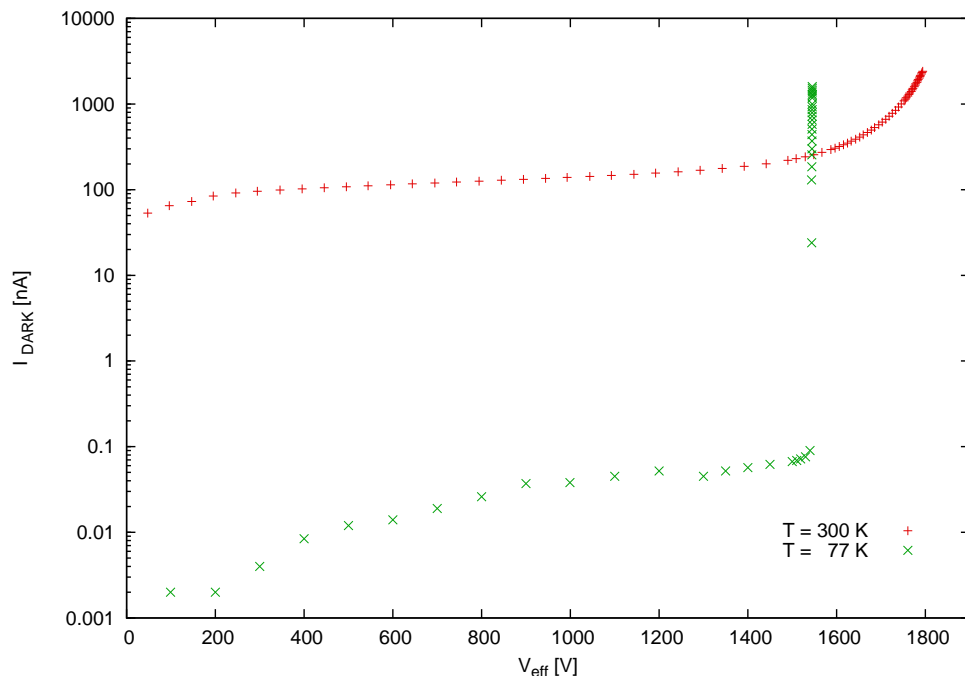


Figura 5.4: Corrente di buio a  $300K$  e  $77K$  in funzione della tensione effettiva ai capi dell'APD

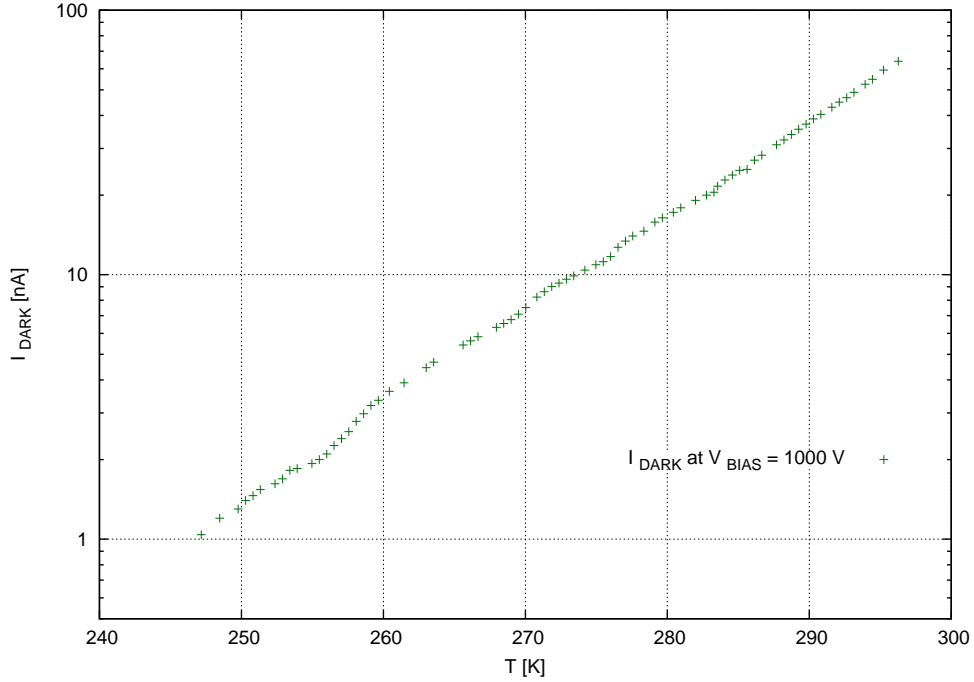


Figura 5.5: Corrente di buio in funzione della temperatura dell'APD. Dati presi a  $V_{BIAS} = 1000 V$ .

## 5.4 Misure di guadagno con LED

Per effettuare le misure di guadagno è stato utilizzato un segnale luminoso proveniente da un LED rosso ( $\sim 700 nm$ ) attraverso la finestra del dewar in cui è situato l'APD. Il LED è stato posto all'interno di un contenitore apposito costruito per incastrarsi su tale finestra per evitare il più possibile infiltrazioni luminose dall'ambiente esterno.

Innanzitutto è stata fatta una prova per stabilire l'entità dell'illuminazione. Fissata la tensione di polarizzazione sull'APD e il segnale che pilota il LED, si è andati a misurare tramite l'oscilloscopio i valori di tensione provenienti dal preamplificatore e dallo shaper. Conoscendo il valore di guadagno di entrambi gli elementi è possibile risalire alla carica iniettata.

Nelle prove effettuate è stata impostato un impulso con ampiezza di  $4 V$  e durata di  $100 ns$ , corrispondente ad una carica di  $20 fC$  iniettata nel preamplificatore. Basandosi su ciò è possibile andare a calcolare il rumore equivalente dell'apparato.

Il guadagno è stato ottenuto dal rapporto tra il segnale a  $V_{eff}$  rispetto al segnale corrispondente a guadagno unitario, cioè quello relativo a  $V_{eff} \simeq 200 V$ .

Commento: le misure sono state effettuate in un range limitato di  $V_{eff}$  a causa dell'instabilità del LED. Per una misura più affidabile del guadagno è meglio sfruttare la sorgente radioattiva.

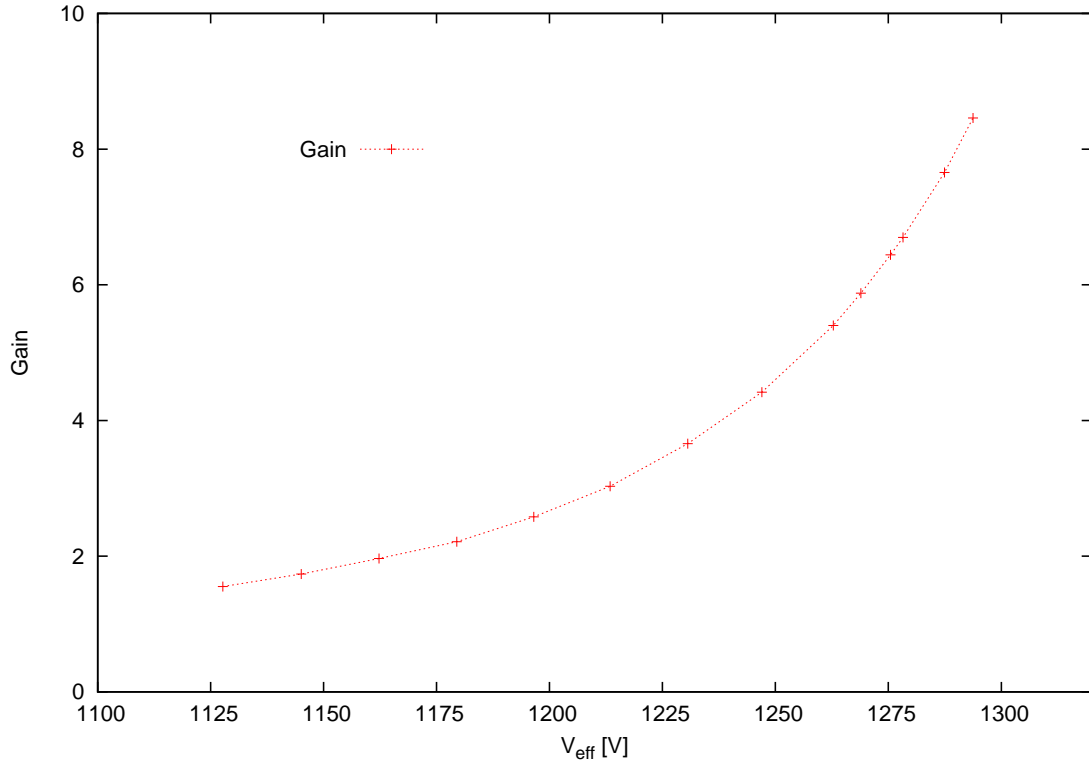


Figura 5.6: Guadagno in funzione della tensione effettiva sull'APD ottenuto tramite illuminazione con LED.

## 5.5 Misure di guadagno con la sorgente di $^{241}\text{Am}$

Oltre che con il LED, abbiamo misurato il guadagno dell'APD anche illuminandolo con raggi X prodotti da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$ , posta sulla finestra coperta del rivelatore, le cui linee principali di emissione sono a  $59,5\text{keV}$  e a  $13,6\text{keV}$ .

In figura 5.7 viene riportato uno spettro in ampiezza a  $T = 300\text{K}$ ,  $V_{BIAS} = 1780\text{V}$  e  $\tau = 1\mu\text{s}$ .

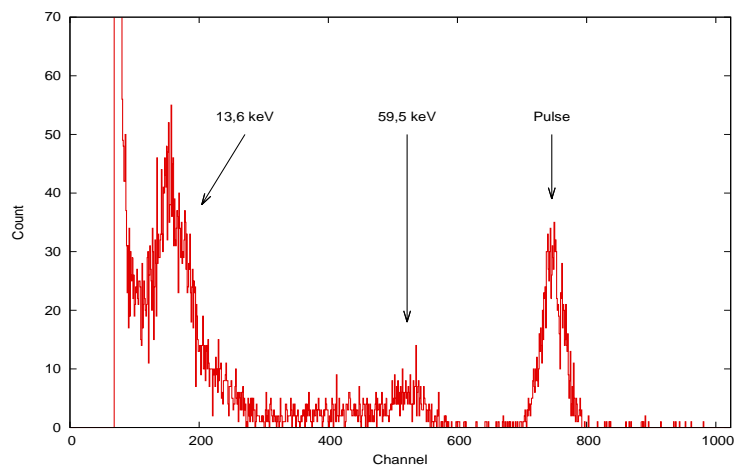


Figura 5.7: Spettro sorgente  $^{241}\text{Am}$ , acquisizione 120 s

La posizione delle due linee misurata con il multicanale è riportata in figura 5.8 in funzione di  $V_{eff}$ , ricavate utilizzando  $\tau = 1\mu\text{s}$  a  $T = 300\text{K}$ .

Convertendo l'energia rilasciata in coppie di portatori (a  $300\text{K}$  sono necessari  $3,6\text{eV}$ ) si ottiene il guadagno in funzione della tensione effettiva ai capi dell'APD. Questo andamento è mostrato in figura 5.9

per  $T = 300K$  e  $T = 77K$  utilizzando shaping time di  $0,25 \mu s$ .

Viene riportato (figura 5.10) il valore del rapporto segnale-rumore, ottenuto per la riga a  $13,6 keV$  al variare della tensione effettiva ai capi dell'APD, sempre per temperature di  $300K$  e  $77K$  utilizzando lo stesso con shaping.

Nei grafici riportati in figura 5.9 e 5.10 è stata applicata la correzione per ricavare  $V_{eff}$ , nota la corrente su  $R_S$ .

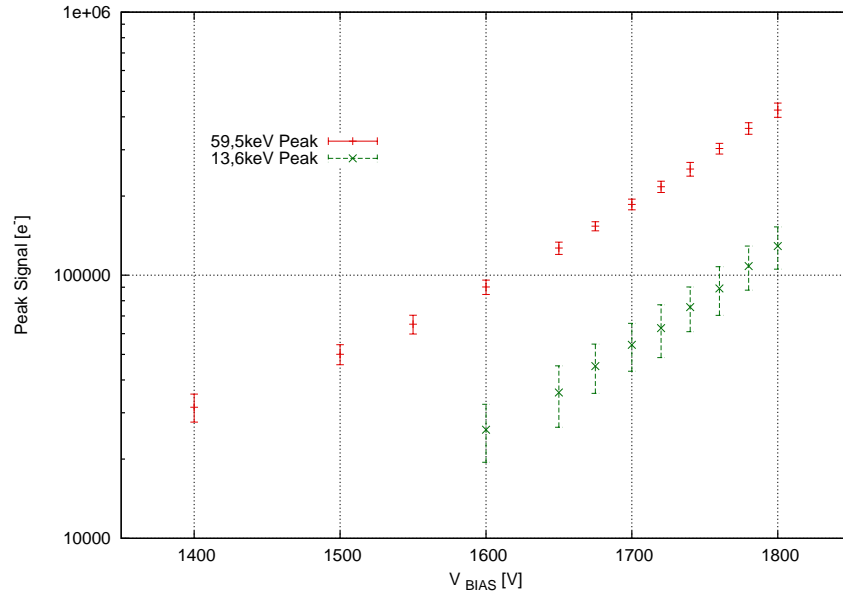


Figura 5.8: Posizione del picco dell'APD in funzione di  $V_{BIAS}$ .

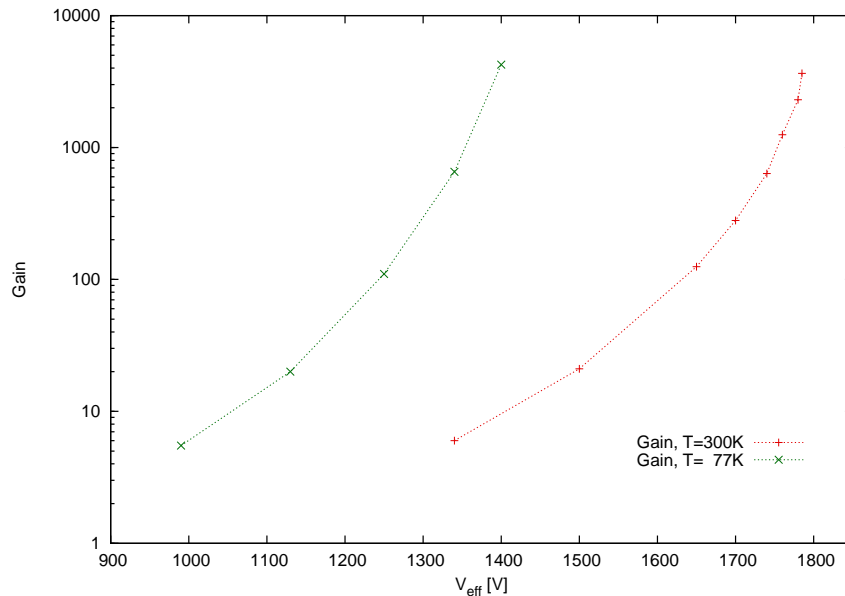


Figura 5.9: Guadagno dell'APD in funzione di  $V_{eff}$  a  $300K$  e a  $77K$ .

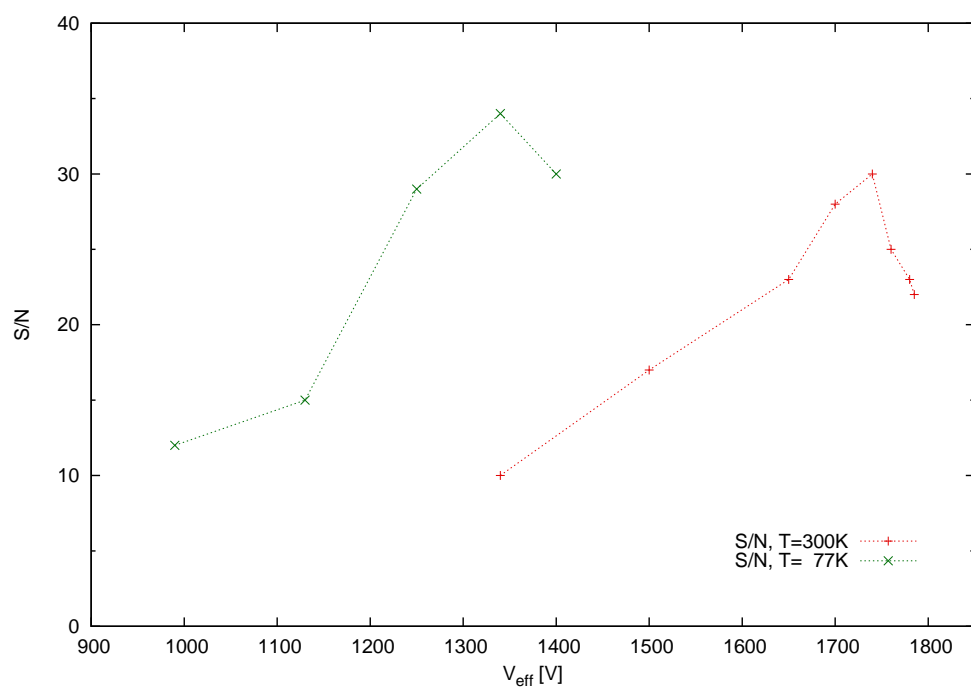


Figura 5.10: Rapporto segnale-rumore dell'APD in funzione di  $V_{eff}$  a 300K e a 77K.



## Capitolo 6

# Conclusioni e lavoro futuro

Il lavoro discusso in questa tesi è consistito nella caratterizzazione di un APD di grande superficie ed elevato guadagno con sensibilità nel vicino infrarosso. Tale studio è preliminare alla realizzazione di un sensore esteso per la rivelazione di fotoni di origine atmosferica.

I risultati relativi alla caratterizzazione dell'elettronica indicano che il preamplificatore scelto contribuisce al rumore con un termine pari a  $500 e^- + 7 e^- / pF$  con un guadagno di circa  $2,4 mV/fC$ .

Riguardo al sistema completo, costituito da APD e catena di elettronica si è visto che il contributo di rumore in corrente, e in particolare del rumore di moltiplicazione dell'APD è dominante nella regione di alto guadagno ( $> 100$ ). Con tempi di integrazione dell'ordine di centinaia di  $ns$  si ottiene un valore ottimale del rapporto segnale-rumore (S/N), dell'ordine di 35, relativo ad un guadagno di circa 1000.

Il raffreddamento del sistema a temperatura di  $77K$  ( $LN_2$ ) comporta effettivamente un aumento di S/N ottimale, ma ci aspettiamo che riduca l'efficienza per la rivelazione dei fotoni infrarossi.

Sarà dunque necessario continuare il lavoro iniziato in questa tesi al fine di misurare la dipendenza dell'efficienza quantica dell'APD per i fotoni IR di interesse in funzione della temperatura. Sarà poi necessario misurare, sempre in funzione della temperatura, l'effettiva sensibilità del rivelatore al singolo fotone, quantificandone l'efficienza di rivelazione in funzione della soglia di discriminazione in ampiezza, avendo fissato le condizioni di efficienza quantica QE e di rapporto segnale-rumore ottimali.

Dai risultati ottenuti si potrà stabilire la temperatura necessaria per un'ottimale rivelazione di singolo fotone IR.





# Bibliografia

- [1] E. Conti et al. *Measurement of the near-infrared fluorescence of the air for the detection of ultra-high-energy cosmic rays*, *Astropart. Phys.*, Vol.34 (2011) p.333
- [2] H. Spieler *Semiconductor Detector Systems* Oxford Univ. Press 2005
- [3] L. Ludhova et al. *Planar LAAPDs: Temperature Dependence, Performance and Application in Low Energy X-ray Spectroscopy* arXiv:physics/0410099
- [4] R. Farrell et al. *High gain APD array for photon detection* SPIE procs. Vol. 2550 (1995) p.266