

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
CAGLIARI



Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in Fisica

Uso di APD a basse temperature
come rivelatori
per la Fisica delle alte energie

Tesi di Laurea Triennale

Relatori:
Dott. Alessandro Cardini
Dott. Adriano Lai

Tesi di laurea di:
Alessandra Lai

Anno Accademico 2010-2011

Indice

Introduzione	1
1 Generalità sugli APD	3
1.1 Principio di funzionamento degli APD	3
1.2 Parametri caratteristici	6
1.2.1 Corrente di buio	6
1.2.2 Guadagno	6
1.2.3 Efficienza quantica e responsività	7
2 Misure non criogeniche	9
2.1 Il metodo sperimentale	9
2.1.1 Principio di misura	9
2.1.2 Descrizione del set-up	10
2.2 Misure di corrente di buio e guadagno	11
2.2.1 Corrente di buio	12
2.2.2 Guadagno	12
3 Misure criogeniche	15
3.1 Il metodo sperimentale	15
3.1.1 Principio di misura	15
3.1.2 Descrizione del set-up	15
3.1.3 Misure preliminari	19
3.2 Misure in azoto liquido	21
3.2.1 Procedura per il raffreddamento	21
3.2.2 Misure di guadagno	22
3.2.3 Guadagno e intensità della radiazione incidente	24
3.3 Misure in elio liquido	25
3.3.1 Misure di guadagno	25
3.3.2 Misure di efficienza quantica relativa	27
4 Lettura di segnali provenienti dall'APD	33
4.1 Catena elettronica di lettura per segnali di carica	33
4.1.1 Il preamplificatore di carica	33

4.1.2	Lo shaper	34
4.2	Realizzazione della catena elettronica di lettura	35
4.2.1	Descrizione del set-up	35
4.2.2	Considerazioni sul rumore	35
4.2.3	Lettura di segnali a temperature criogeniche	35
4.2.4	Calibrazione della catena di lettura	39
4.3	Misure di rumore	41
4.3.1	Metodo di misura	41
4.3.2	Rumore dell'elettronica	41
4.3.3	Rumore dell'APD e dell' elettronica	43
4.4	Analisi del segnale	45
4.4.1	Metodo di misura	45
4.4.2	Risultati	45
	Bibliografia	51
	Ringraziamenti	53

Elenco delle figure

1.1	Caratteristica VI di un comune diodo.	3
1.2	Rappresentazione schematica della moltiplicazione a valanga in un APD.	5
1.3	Strutture interne di diversi APD: (a) <i>beveled-edge</i> , (b) <i>reach-through</i> , (c) <i>reverse type</i> (da sinistra a destra). La seconda e la terza riga illustrano rispettivamente il campo elettrico e il guadagno in funzione del punto in cui il fotone viene convertito all'interno del rivelatore.	5
2.1	Schema del set up utilizzato.	11
2.2	Corrente di buio dell'APD in funzione della tensione e a diverse temperature.	12
2.3	Guadagno dell'APD in funzione della tensione applicata e a diverse temperature, $\lambda=480$ nm.	13
3.1	Criostato.	17
3.2	Sezione del criostato.	18
3.3	Posizionatore per l'APD.	19
3.4	Guadagno dell'APD corrispondente a diverse lunghezze d'onda in funzione della tensione applicata, temperatura ambiente.	20
3.5	Andamento della temperatura in funzione del tempo.	22
3.6	Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 294 K e a 77 K.	23
3.7	Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 77 K, diverse intensità luminose.	24
3.8	Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 4 K, due diverse intensità luminose	26
3.9	Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 1.7 K, $\lambda_1=480$ nm, $\lambda_2=621$ nm	26
3.10	Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 4.5 K e 1.7 K.	28

3.11	Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 294 K, 77 K, 1.7 K.	28
3.12	Andamento della corrente dell'APD durante i cicli di misura della RQE.	29
3.13	Corrente di buio (punti sperimentali e punti ricavati mediante interpolazione) dell'APD in funzione dell'inverso della temperatura.	29
3.14	RQE dell'APD con $V_{bias} = 200$ V e due diverse intensità luminose.	31
3.15	RQE dell'APD con $V_{bias} = 200$ V al variare della temperatura.	31
4.1	Preamplificatore di carica.	34
4.2	Schema circuitale della catena di lettura dell'APD.	37
4.3	APD, FET e rete di feedback.	38
4.4	Dettaglio del circuito mostrato in 4.2 che verrà messo a freddo.	38
4.5	A250.	39
4.6	Spettro di cinque segnali di calibrazione: 1.58 fC, 3.16 fC, 4.75 fC, 6.33 fC, 7.91 fC.	40
4.7	Circuito originale dell'A250; il FET è posto in prossimità dell'A250.	42
4.8	Rumore minimo misurato in funzione della tensione di alimentazione dell'APD a diverse temperature.	44
4.9	Spettro di un segnale di carica proveniente dalla sorgente di ^{55}Fe , $V_{bias} = 1630$ V.	46
4.10	Confronto tra i guadagni dell'APD misurati con la sorgente di ^{55}Fe ed il LED IR a temperatura ambiente.	47
4.11	Guadagno dell'APD a 294 K e 237 K misurato con la sorgente di ^{55}Fe	47

Elenco delle tabelle

4.1	Rumore dell'APD e dell'elettronica (espresso in elettroni rms) a 294 K.	44
4.2	Rumore dell'APD e dell'elettronica (espresso in elettroni rms) a 245 K.	44

Misurare prima per non pentirsi poi

Introduzione

Scopo di questo lavoro di tesi è lo studio del funzionamento di APD (Avalanche PhotoDiode) a bassa temperatura. L'interesse verso questo tipo di dispositivo nasce dall'esigenza di realizzare rivelatori di luce che possano lavorare a basse temperature ed essere sottoposti a campi magnetici elevati.

Questo studio si inquadra in un progetto più ampio per la realizzazione di bersagli attivi polarizzabili magneticamente [1]. Infatti la sezione d'urto di diffusione di particelle elementari può avere, in certi casi, una forte dipendenza dalla polarizzazione del bersaglio.

Un elevato grado di magnetizzazione si può ottenere, in scintillatori inorganici (GSO), portandoli a basse temperature e sottoponendoli a elevati campi magnetici [2]. Di conseguenza è interessante e comodo disporre di rivelatori di luce da accoppiare a tali bersagli che possano lavorare nelle medesime condizioni.

I rivelatori a semiconduttore sono dei buoni candidati per questo scopo; infatti, a differenza dei fototubi, il loro funzionamento non è influenzato dal campo magnetico.

La tesi è articolata in quattro capitoli: nel primo si presentano alcune caratteristiche fondamentali degli APD; nei capitoli centrali si illustrano modalità e risultati delle misure di tali caratteristiche, effettuate a temperature criogeniche e non; nel quarto ed ultimo capitolo si affronta la problematica relativa all'accoppiamento tra APD ed elettronica di lettura, mostrando dei risultati preliminari sulla calibrazione di una possibile catena di lettura del segnale.

Capitolo 1

Generalità sugli APD

1.1 Principio di funzionamento degli APD

Un fotodiodo a valanga (Avalanche PhotoDiode, d'ora in avanti APD) [3] è un dispositivo ottico generalmente in Silicio o Germanio, dotato di guadagno interno. È a tutti gli effetti un diodo che viene fatto lavorare in condizioni di polarizzazione inversa. La caratteristica tensione-corrente di un diodo è mostrata in Figura 1.1.

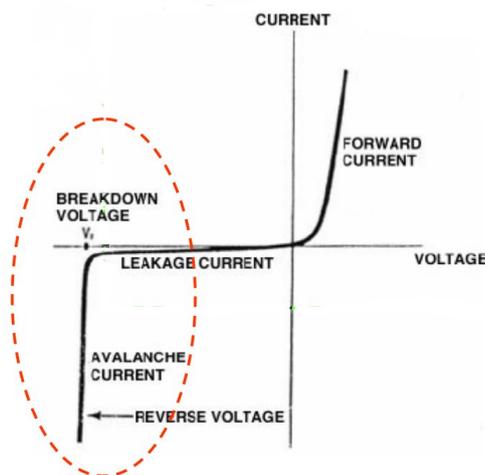


Figura 1.1: Caratteristica VI di un comune diodo.

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 in-

versa (il diodo è nella condizione di funzionamento a valanga evidenziata in figura 1.1), all'interno della giunzione si genera un campo elettrico intenso, dell'ordine di 10^5 V/cm, che accelera i portatori, i quali acquistano sufficiente energia da produrre coppie elettrone-lacuna tramite ionizzazione per impatto. Le cariche secondarie possono a loro volta liberare 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* (Figura 1.2). La corrente generata prende il nome di *fotocorrente* ed è proporzionale al numero di fotoni incidenti con $E > E_{gap}$.

Gli APD attualmente in commercio si differenziano tra loro per la geometria della giunzione [4], ovvero per la profondità della regione nella quale avviene la moltiplicazione; alcune delle geometrie più comuni sono mostrate in Figura 1.3.

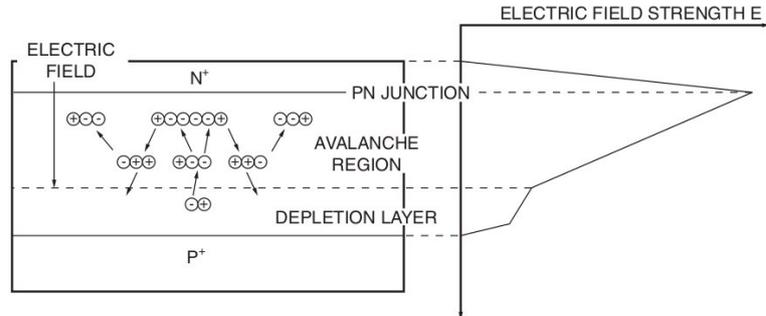


Figura 1.2: Rappresentazione schematica della moltiplicazione a valanga in un APD.

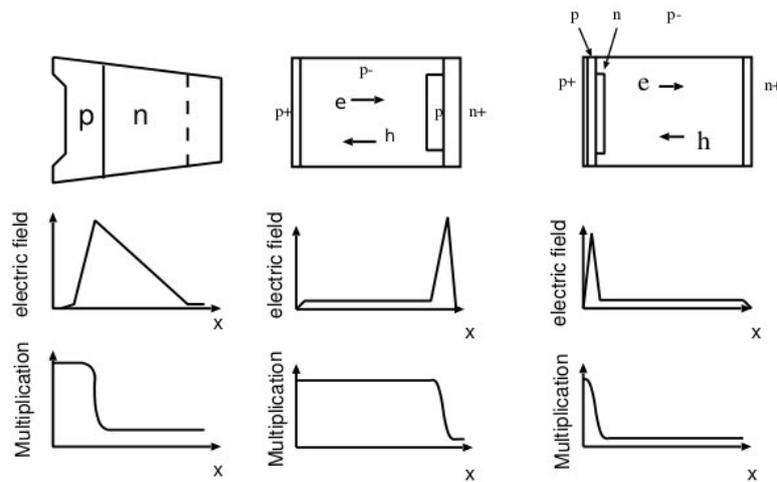


Figura 1.3: Strutture interne di diversi APD: (a) *beveled-edge*, (b) *reach-through*, (c) *reverse type* (da sinistra a destra). La seconda e la terza riga illustrano rispettivamente il campo elettrico e il guadagno in funzione del punto in cui il fotone viene convertito all'interno del rivelatore.

1.2 Parametri caratteristici

1.2.1 Corrente di buio

Un parametro rilevante per quanto riguarda gli APD è la *corrente di buio* o *dark current* (I_D) ovvero la corrente di perdita in assenza di illuminazione. In prima approssimazione può essere espressa come segue:

$$I_D = I_{ds} + G \cdot I_{dg} \quad (1.1)$$

Come si vede nella formula essa è data dalla somma di due componenti:

- I_{ds} è una corrente di perdita che non scorre nella zona di moltiplicazione;
- I_{dg} è una corrente interna soggetta a moltiplicazione e per questo è moltiplicata 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.

1.2.2 Guadagno

La caratteristica fondamentale degli APD è il *guadagno interno* (G). Sfruttando la formula precedente possiamo asserire che:

$$G = \frac{I_D - I_{ds}}{I_{dg}}$$

Considerando che I_{ds} è generalmente piccolo rispetto a I_D possiamo dunque scrivere:

$$G \approx \frac{I_D}{I_{dg}}$$

Il guadagno dipende fortemente dal campo elettrico applicato nella zona

di moltiplicazione. In generale maggiore è la tensione inversa, maggiore è il guadagno.

Il limite al massimo guadagno raggiungibile è legato al fenomeno di breakdown della giunzione. In questa condizione la corrente che circola nella giunzione non è più proporzionale all'illuminazione dell'APD.

Il guadagno mostra inoltre una forte dipendenza dalla temperatura: per un dato valore di tensione inversa esso si riduce progressivamente all'aumentare della temperatura. Infatti, a temperature elevate il reticolo cristallino vibra maggiormente e dunque i portatori subiscono urti con esso prima di aver raggiunto l'energia necessaria per produrre ionizzazione. In queste condizioni è dunque necessario un campo elettrico più elevato per ottenere un dato guadagno.

1.2.3 Efficienza quantica e responsività

Altri parametri importanti sono l'*efficienza quantica* (QE) e la *responsività* (R).

L'efficienza quantica indica la probabilità che un fotone incidente generi una coppia disponibile per la conduzione. È definita come numero di coppie elettrone-lacuna prodotte per singolo fotone incidente:

$$QE = \frac{N_{coppie}}{N_{\gamma}}$$

La responsività indica la risposta del dispositivo ad una lunghezza d'onda fissata. Si definisce come il rapporto tra la fotocorrente e la potenza ottica incidente ad una data lunghezza d'onda:

$$R[A/W] = \frac{I_{phc}}{P_{ott.in}} = QE \frac{q}{E_{\gamma}}$$

dove q è la carica dell'elettrone.

Capitolo 2

Misure non criogeniche

Le prime misure effettuate hanno lo scopo di verificare, a temperature non criogeniche, le caratteristiche degli APD; in particolare esamineremo l'andamento del guadagno e della corrente di buio in funzione della tensione applicata e della temperatura.

Per i nostri scopi abbiamo scelto un APD della API mod. 155-10-016 che è di tipo (a) (Figura 1.3).

La particolare struttura degli APD “beveled-edge” è tale che:

- la zona di guadagno è sufficientemente profonda, il che garantisce una buona uniformità di guadagno nel visibile;
- si possono raggiungere tensioni di alimentazione fino a 2 kV prima di raggiungere la tensione di breakdown;
- si possono raggiungere guadagni elevati, dell'ordine di alcune migliaia.

2.1 Il metodo sperimentale

2.1.1 Principio di misura

Sono state effettuate misure di corrente media dell'APD.

Le quantità misurabili direttamente sono la corrente di buio e la corrente totale (ovvero la somma tra la corrente di buio e la fotocorrente); da queste misure si ricava il guadagno.

Al variare della tensione applicata misuriamo la corrente di buio dell'APD

in assenza di illuminazione; in condizioni di illuminazione costante, misuriamo la corrente totale, in modo da ricavare la fotocorrente per differenza.

Sappiamo che a bassa tensione non c'è moltiplicazione perché, come già detto, è necessario raggiungere una tensione di soglia V_0 per innescare il processo. In queste condizioni imponiamo che il guadagno sia unitario. A questo punto ricaviamo il guadagno come segue:

$$G = \frac{I_{tot}(V) - I_D(V)}{I_{tot}(V < V_0) - I_D(V < V_0)} = \frac{I_{pc}(V)}{I_{pc}(V < V_0)}, \quad G(V < V_0) \equiv 1$$

2.1.2 Descrizione del set-up

Per realizzare le misure abbiamo utilizzato:

- LED blu (480 ± 15 nm) e LED rosso (621 ± 7 nm) per illuminare l'APD;
- generatore di tensione CAEN N471 HV Power Supply per l'alimentazione dell'APD;
- elettrometro KEITHLEY 6517A per la misura della corrente dell'APD;
- generatore di tensione costante KEITHLEY 2410 1100V SOURCE METER per l'alimentazione dei LED.

I LED sono stati alimentati in tensione poiché con alcune semplici prove si è osservato che in questo modo l'output in luce è più stabile. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che le correnti utilizzate sono di alcuni ordini di grandezza inferiori rispetto a quelle tipiche di funzionamento; ossia nella curva caratteristica tensione-corrente del LED ci troviamo in una zona in cui la corrente, e quindi la luce prodotta, varia poco con la tensione.

L'APD è stato montato su un supporto in teflon, materiale isolante adatto all'uso anche a basse temperature, posizionato all'interno di una scatola in modo tale che entrambi i LED, quando accesi, siano in grado di illuminarlo.

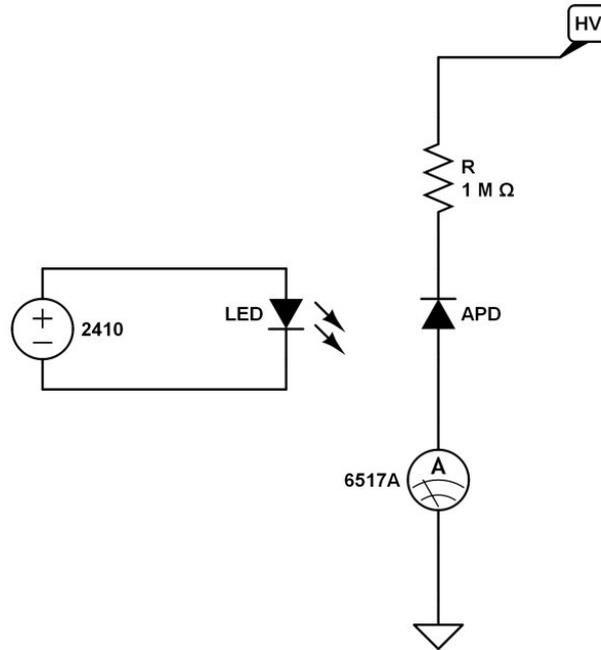


Figura 2.1: Schema del set up utilizzato.

Dai poli dell'APD partono due cavi: uno collegato all'alimentore di alta tensione e l'altro a massa attraverso l'elettrometro (Fig. 2.1).

La corrente è stata misurata sul polo freddo del circuito poiché non si aveva a disposizione un misuratore funzionante ad alta tensione.

La tensione effettiva sull'APD non è esattamente quella impostata nel generatore poiché abbiamo inserito in serie una resistenza di protezione pari a $1\text{ M}\Omega$. Tuttavia di questo si tiene conto nei risultati.

Il set-up descritto ha una sensibilità di circa 1 pA .

2.2 Misure di corrente di buio e guadagno

La prima serie di misure è stata effettuata a temperatura ambiente 294 K , esplorando un range che va da qualche decina di V fino a oltre 1800 V di tensione di alimentazione. Con l'ausilio di un frigorifero abbiamo ripetuto le misure a temperature inferiori a quella ambiente.

2.2.1 Corrente di buio

La corrente di buio è la prima quantità che abbiamo misurato poiché serve per la determinazione del guadagno. Su un intervallo di temperature di circa 50 gradi (Figura 2.2), la corrente di buio varia di oltre due ordini di grandezza e, come ci si aspettava, diminuisce al diminuire della temperatura.

A temperature inferiori a quella ambiente l'andamento delle curve corrispondenti sembra qualitativamente in accordo con la definizione data (equazione 1.1): fintantoché il guadagno è unitario, la corrente di buio si mantiene approssimativamente costante, poi aumenta in corrispondenza della tensione di innesco del guadagno. Questo sembra essere dovuto al contributo delle due componenti I_{dg} e I_{ds} .

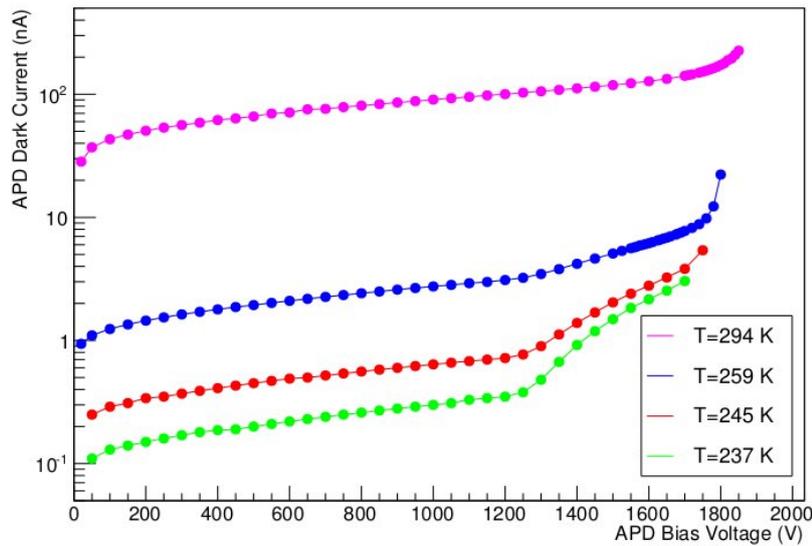


Figura 2.2: Corrente di buio dell'APD in funzione della tensione e a diverse temperature.

2.2.2 Guadagno

Il guadagno in funzione della tensione di alimentazione è stato ricavato sfruttando il metodo descritto nel paragrafo 2.1.1. La Figura 2.3 mostra l'andamento del guadagno in funzione della tensione applicata per tutte

le temperature considerate. Come ci si aspettava, a parità di tensione

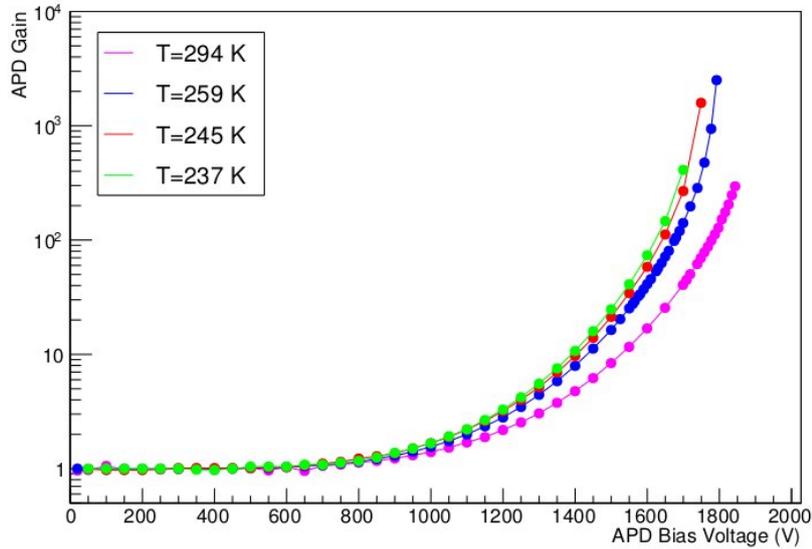


Figura 2.3: Guadagno dell'APD in funzione della tensione applicata e a diverse temperature, $\lambda=480$ nm.

il guadagno aumenta al diminuire della temperatura. Vediamo che si discosta poco dall'unità fino a tensioni dell'ordine di 1000 V indipendentemente dalla temperatura. Superata questa soglia si innesca il processo di moltiplicazione e cominciano ad evidenziarsi differenze. Per esempio, in corrispondenza di 1700 V il guadagno misurato a $T = 237$ K è circa dieci volte più grande rispetto a quello misurato a $T = 294$ K.

A temperature inferiori a quella ambiente il massimo guadagno raggiunto è dell'ordine di 10³, in corrispondenza di 1800 V. A temperatura ambiente, invece, il massimo guadagno raggiunto è inferiore di un ordine di grandezza avendo deciso, durante le misure, di non avere correnti maggiori di 10 μ A per contenere la potenza massima dissipata dal dispositivo.

I risultati ottenuti fin'ora sono sostanzialmente in accordo con ciò che è noto sul funzionamento degli APD in un range di temperatura prossimo a quello da noi considerato.

Capitolo 3

Misure criogeniche

Con questa serie di misure ci proponiamo di studiare il funzionamento dell'APD e misurarne le caratteristiche a temperature criogeniche. Effettueremo misure di corrente di buio, guadagno ed efficienza quantica relativa (RQE) al variare della temperatura.

3.1 Il metodo sperimentale

3.1.1 Principio di misura

Il guadagno e la corrente di buio vengono misurati con il metodo precedentemente usato e descritto al paragrafo 2.1.1.

L'efficienza quantica è necessaria per determinare la capacità dell'APD di convertire i fotoni incidenti in coppie disponibili per la conduzione. Poiché non ne conosciamo esattamente il valore (comunque prossimo all'80%), consideriamo che la risposta dell'APD a temperatura ambiente sia 100% e misuriamo al variare della temperatura, le eventuali variazioni percentuali rispetto a tale riferimento; definiamo in questo modo l'efficienza quantica relativa (RQE). La misura viene effettuata in un dato intervallo di temperatura, in assenza di moltiplicazione ($G = 1$) e con illuminazione costante.

3.1.2 Descrizione del set-up

Il set-up è analogo a quello utilizzato per le misure non criogeniche (Capitolo 2). L'unica differenza risiede nell'uso di un criostato, Janis Research

mod. SVT, (Figura 3.1 e 3.2) nel quale viene inserito il rivelatore.

L'APD, montato nel supporto in teflon precedentemente descritto, viene introdotto dall'alto all'interno della camera del criostato tramite un'asta rigida. L'asta, oltre a consentire il posizionamento del campione al centro, permette anche di portare all'esterno i due cavi di alta tensione per l'alimentazione dell'APD (Figura 3.3) e una sonda di temperatura. Il criostato ha delle finestre ottiche grazie alle quali si può illuminare l'APD tenendo i LED all'esterno, alla temperatura del laboratorio.



Figura 3.1: Criostato.

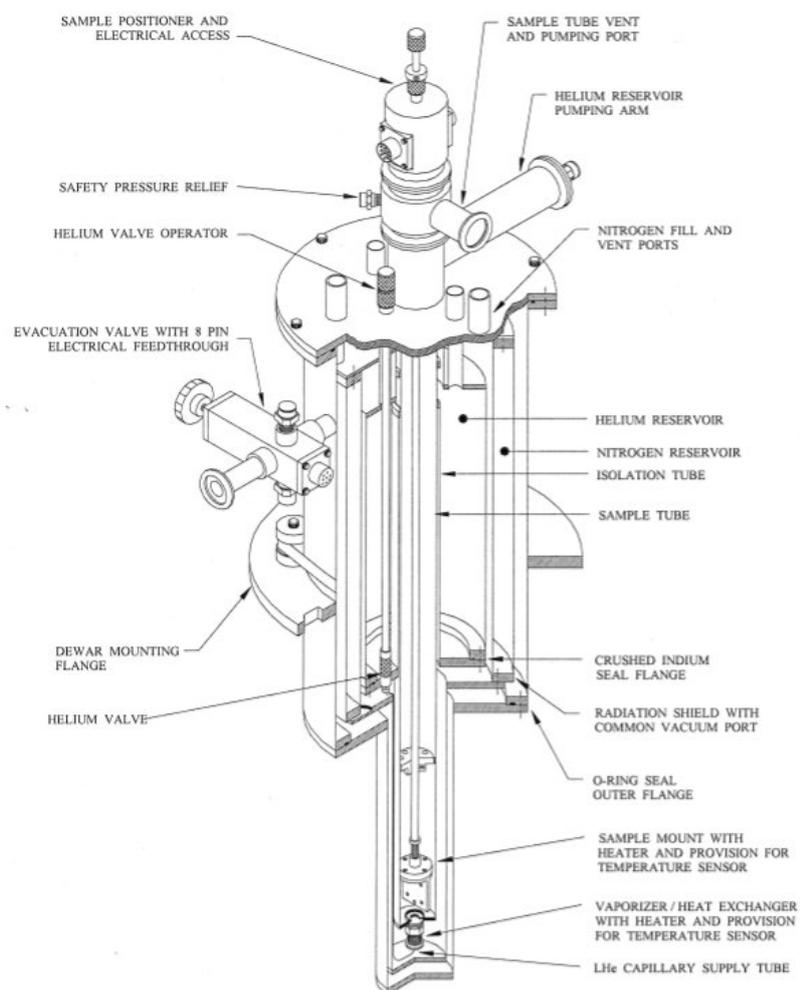


Figura 3.2: Sezione del criostato.



(a) Posizionatore per l'APD.



(b) Dettaglio: APD nel supporto di teflon.

Figura 3.3: Posizionatore per l'APD.

3.1.3 Misure preliminari

Per verificare il corretto funzionamento del nuovo set-up abbiamo eseguito una serie di misure di guadagno e corrente di buio in funzione della tensione di alimentazione a temperatura ambiente illuminando l'APD con i LED già usati. Poiché la temperatura è confrontabile con quella rilevata durante le misure precedenti, ci aspettiamo di osservare risposte simili.

Inoltre abbiamo utilizzato altri due LED:

- LED UV (406 ± 6 nm);
- LED IR (862 ± 40 nm);

con lo scopo di verificare la risposta del rivelatore anche a queste lunghezze d'onda.

I risultati di questa prima serie di misure (Figura 3.4) permettono di fare alcune considerazioni:

1. l'andamento del guadagno relativo al LED blu è concorde con quello precedentemente osservato;

2. la risposta dell'APD a diverse lunghezze d'onda non è la stessa.

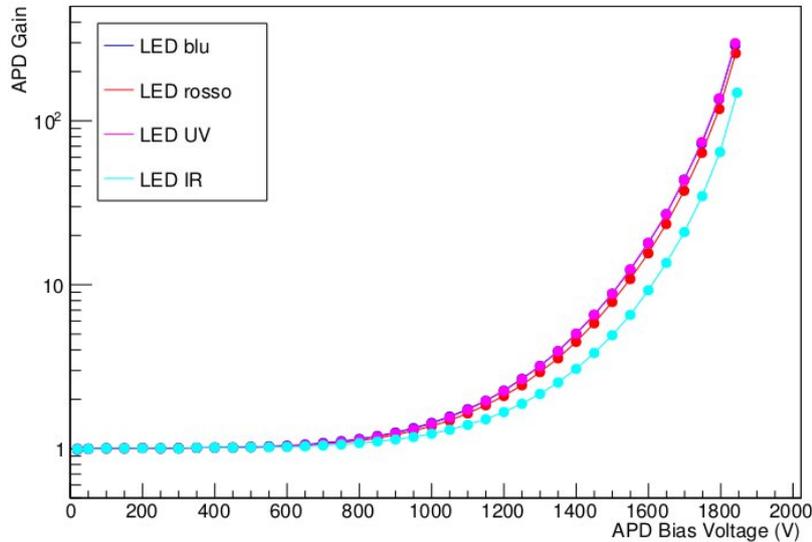


Figura 3.4: Guadagno dell'APD corrispondente a diverse lunghezze d'onda in funzione della tensione applicata, temperatura ambiente.

Da sinistra a destra in Figura 3.4 vediamo: le curve relative ai LED blu e UV sovrapposte, la curva relativa al LED rosso e infine quella relativa al LED IR. Questo significa che il guadagno dell'APD nel caso in cui esso venga illuminato con radiazione blu o ultravioletta, a parità di tensione, è pressoché uguale, poi decresce in maniera inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Questo andamento può essere spiegato considerando la struttura longitudinale dell'APD e l'attenuazione della luce in silicio. In silicio la radiazione blu ha una lunghezza media di attenuazione di $0.88 \mu\text{m}$ e l'UV di $0.13 \mu\text{m}$. Considerando che la radiazione sia interamente assorbita in circa tre volte questa lunghezza, possiamo dedurre che il processo di moltiplicazione su uno spessore di circa $3 \mu\text{m}$ dalla superficie sia uniforme ed avvenga con la massima efficienza. Le radiazioni IR e rossa, avendo lunghezze medie di attenuazione maggiori ($3.10 \mu\text{m}$ per il rosso, $29.85 \mu\text{m}$ per l'IR) penetrano in zone più profonde, rispettivamente dell'ordine delle decine e centinaia di μm . A causa della struttura interna dell'APD,

in tali zone la moltiplicazione è meno efficiente rispetto ai casi precedenti. Dunque, solo la parte della radiazione assorbita entro $3 \mu\text{m}$ dalla superficie viene moltiplicata con la massima efficienza; la restante parte con efficienza minore. Questo si traduce in una riduzione del guadagno medio misurato. Se ne deduce che il guadagno dipende dalla zona di assorbimento e moltiplicazione della carica.

Per questo motivo, nel seguito abbiamo utilizzato solamente la radiazione blu.

3.2 Misure in azoto liquido

Il fine di questo studio è portare l'APD alla temperatura dell'elio liquido (4 K) per osservarne il comportamento. Per familiarizzare con il criostato e con i metodi sperimentali abbiamo eseguito una serie di misure alla temperatura intermedia dell'azoto liquido (77 K).

3.2.1 Procedura per il raffreddamento

I punti chiave della procedura di raffreddamento sono:

Evacuazione

Una pompa turbo-molecolare fa un vuoto di circa 10^{-5} Torr nello spazio tra la camera del campione e la riserva d'elio, tra la riserva d'elio e la riserva di azoto (vuoto di isolamento). La pompa viene spenta quando si comincia il riempimento col liquido criogenico.

Cicli di svuotamento e riempimento

Per rimuovere i gas residui ed evitare fenomeni di condensa vengono fatti alcuni cicli di svuotamento e riempimento nella riserva d'elio e nella camera del campione. Lo svuotamento viene fatto tramite una pompa rotativa (10^{-3} Torr) e il riempimento con elio.

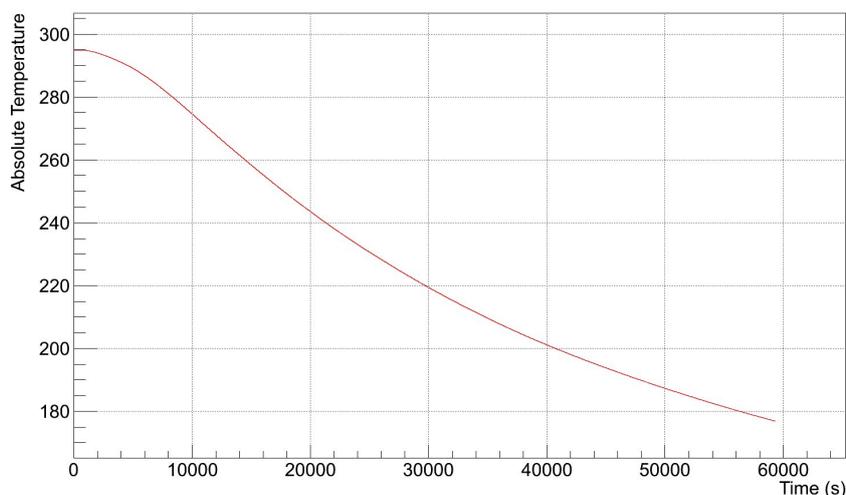


Figura 3.5: Andamento della temperatura in funzione del tempo.

Pre-raffreddamento

Si realizza il pre-raffreddamento introducendo azoto liquido nella camicia esterna. In circa 17 ore si passa da temperatura ambiente a circa 170 K. (Figura 3.5). In questa fase il campione si raffredda per irraggiamento.

Raffreddamento

Una volta raggiunta una temperatura prossima a 170 K, l'azoto viene inserito nella cosiddetta riserva d'elio e fatto evaporare nella camera del campione in modo controllato mediante una valvola a spillo. In questo modo il rivelatore si raffredda ulteriormente per conduzione.

3.2.2 Misure di guadagno

La prima cosa che questa serie di misure permette di osservare è che l'APD funziona correttamente anche a $T = 77$ K; tuttavia ci sono alcune differenze rispetto ai casi precedenti.

Si osservi il grafico in Figura 3.6 che mette a confronto i guadagni in funzione della tensione di alimentazione corrispondenti a $T = 294$ K e $T = 77$ K. La tensione in corrispondenza della quale il guadagno diventa sensibilmente diverso dall'unità è fortemente dipendente dalla temperatura: nella curva relativa alla misura a temperatura ambiente l'innesco

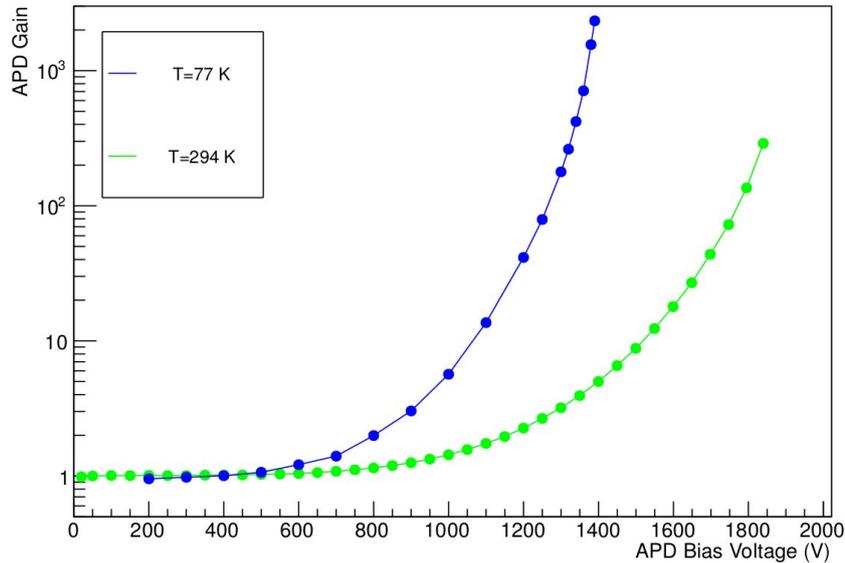


Figura 3.6: Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 294 K e a 77 K.

della valanga avviene intorno ai 1200 V; nella curva relativa alla misura in azoto liquido, intorno a 800 V.

Il motivo di questo andamento è legato al concetto di *mobilità* dei portatori. La mobilità μ è la capacità che i portatori hanno di muoversi all'interno del semiconduttore sotto l'azione di un campo elettrico e può essere espressa come segue:

$$\mu = \frac{q\tau}{m}$$

dove q è la carica del portatore, m la sua massa e τ è il tempo libero medio di collisione.

Essa è inversamente proporzionale alla temperatura, secondo la formula nota come Relazione di Einstein

$$\mu = \frac{qD}{kT}$$

dove D è il coefficiente di diffusione o diffusività e T è appunto la temperatura.

Segue da queste due equazioni che a basse temperature aumenta il tempo medio tra due urti. Essendo gli urti meno frequenti, i portatori sono in

grado di raggiungere l'energia cinetica necessaria per innescare la moltiplicazione a valanga anche a tensioni relativamente basse.

Per questo motivo, ci aspettiamo che alla temperatura dell'elio liquido, la valanga si inneschi per tensioni inferiori.

3.2.3 Guadagno e intensità della radiazione incidente

La curva del guadagno relativa a $T = 77$ K mostrata in Figura 3.6 fa parte di una serie di misure effettuate per diverse tensioni di alimentazione del LED. Le condizioni di minima, media, alta e altissima luminosità mostrate in Figura 3.7 corrispondono rispettivamente a fotocorrenti di 10 pA, 100 pA, 600 pA e 2500 pA in condizioni di guadagno unitario (tensione di alimentazione pari a 200 V). Tale serie permette di evidenziare un fenomeno non osservato a temperatura ambiente.

Nelle tre condizioni di luminosità maggiore e a tensioni elevate si os-

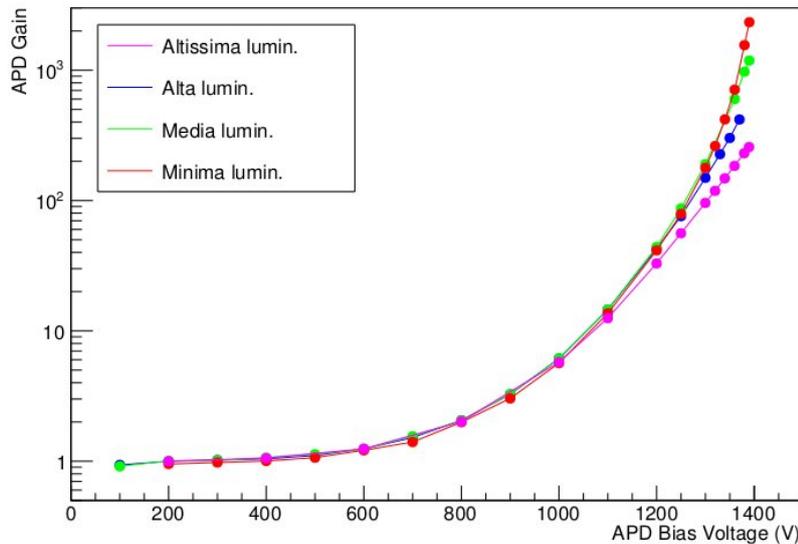


Figura 3.7: Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 77 K, diverse intensità luminose.

serva un fenomeno di quenching del guadagno. Questo significa che la risposta dell'APD dipende dall'intensità della radiazione incidente e tale dipendenza è evidente, nel range di tensioni da noi esplorato, solo per basse temperature.

Questo fenomeno è legato alla resistività del silicio. La resistività dell'APD può essere modellizzata come una resistenza esterna in serie alla giunzione [5]. Tale resistenza limita la tensione presente ai capi della giunzione (V_{eff}). Sia

$$V_{eff} = V_{bias} - IR_s$$

dove IR_s è proprio la caduta di tensione ai capi di questa resistenza. Poiché la corrente I dipende dal numero di fotoni incidenti (e dunque dall'intensità della luce) e la resistenza R_s è inversamente proporzionale alla temperatura secondo la legge $R \propto T^{-1.5}$, la tensione efficace è tanto più piccola quanto la luce è intensa e quanto più la temperatura è bassa. Per evitare fenomeni di saturazione di questo tipo, nelle misure successive sono state utilizzate intensità di luce confrontabili con quella relativa alla curva rossa (Figura 3.7).

3.3 Misure in elio liquido

La procedura di raffreddamento è stata ripetuta inserendo nella riserva elio liquido anziché azoto.

3.3.1 Misure di guadagno

Le misure sono state eseguite con l'APD in vapori d'elio ($T = 4.5$ K) e a bagno in elio superfluido ($T = 1.7$ K, pressioni inferiori a 33 mbar). A $T = 4.5$ K, sottoponendo l'APD a due diverse intensità luminose, si misurano guadagni simili e non si osservano fenomeni di quenching del guadagno (Figura 3.8).

Poiché le intensità di luce utilizzate sono entrambe sufficientemente basse da non causare fenomeni di saturazione, possiamo usarle indistintamente per le successive misure.

A $T = 1.7$ K il guadagno in corrispondenza di due diverse lunghezze d'onda, rosso e blu, (Figura 3.9) mostra un andamento simile a quello osservato a temperatura ambiente (Figura 3.4), ovvero un guadagno ridotto per la radiazione rossa rispetto a quella blu.

Confrontando le due curve relative alla radiazione blu, ma a temperature differenti osserviamo che sono sovrapposte, ovvero che l'APD funziona

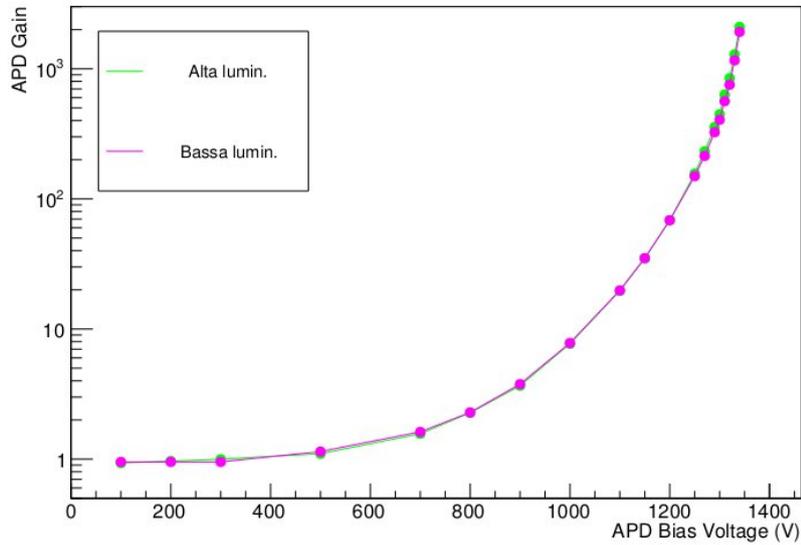


Figura 3.8: Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 4 K, due diverse intensità luminose

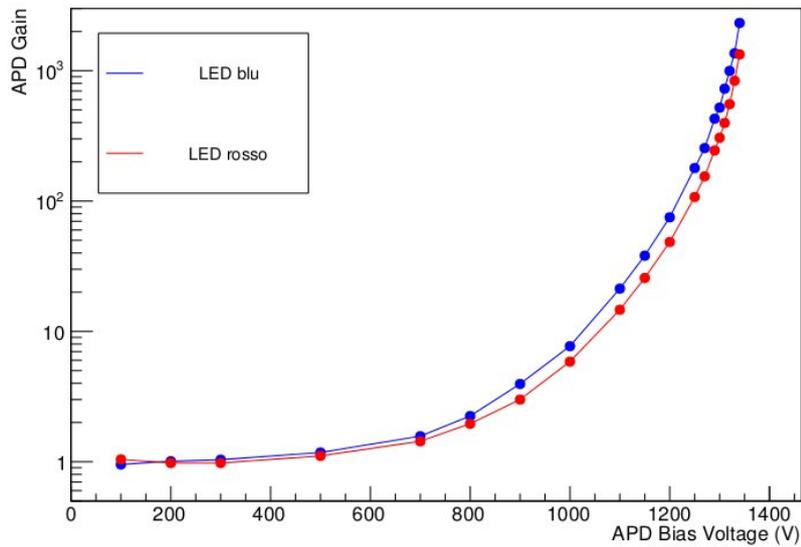


Figura 3.9: Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 1.7 K, $\lambda_1=480$ nm, $\lambda_2=621$ nm

allo stesso modo in vapori d'elio o a bagno in elio superfluido (Figura 3.10).

In Figura 3.11 osserviamo le curve di guadagno relative a $T = 294$ K, $T = 77$ K e $T = 1.7$ K. I risultati confermano quanto ci si aspettava, ovvero che a $T = 1.7$ K il processo di moltiplicazione a valanga si innesca in corrispondenza di tensioni di alimentazione inferiori rispetto a quanto osservato alla temperatura dell'azoto liquido.

I risultati ottenuti mostrano che l'APD funziona correttamente, sia in vapori che in liquido, fino alla temperatura dell'elio superfluido e si raggiungono guadagni superiori a 2000.

3.3.2 Misure di efficienza quantica relativa

In condizioni di guadagno unitario ($V_{bias} = 200$ V) misuriamo la corrente in tre diverse situazioni:

- assenza di illuminazione: corrente di buio;
- due diverse intensità luminose: corrente totale;

Un software gestisce l'alimentazione del LED in modo da avere cicli di 900 s, suddivisi in tre fasi da 300 s ciascuna: assenza di illuminazione, debole illuminazione ($I_{pc} = 100$ pA) e intensa illuminazione (circa 100 volte maggiore della precedente). Inoltre lo stesso software acquisisce la corrente dell'APD una volta al secondo. Il sistema viene monitorato tra 1.7 K e 290 K, in fase di riscaldamento. Questa fase, infatti, è molto lenta e le condizioni sono sufficientemente stabili per poter considerare che la temperatura non vari in modo sostanziale sui tempi scala di un ciclo di misura. Le correnti misurate sono graficate in Figura 3.12.

Per la valutazione dell'efficienza quantica relativa consideriamo, in ogni fase del ciclo, solo i dati acquisiti negli ultimi 150 s per eliminare effetti di transiente, e ne facciamo la media. In questo modo si ha un valore di corrente per ogni fase. Per determinare la fotocorrente sottraiamo a ciascuna corrente totale la corrente di buio relativa alla medesima temperatura, ottenuta tramite interpolazione lineare tra due punti consecutivi.

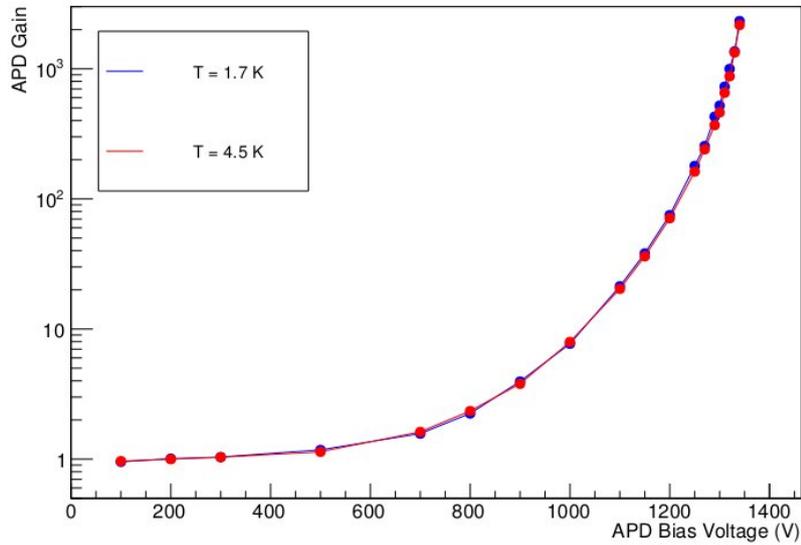


Figura 3.10: Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 4.5 K e 1.7 K.

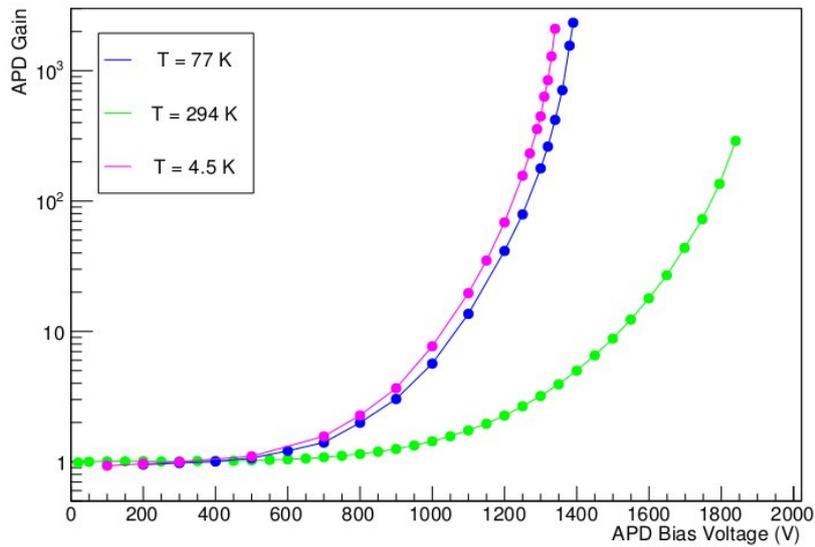


Figura 3.11: Guadagno dell'APD in funzione della tensione di alimentazione a 294 K, 77 K, 1.7 K.

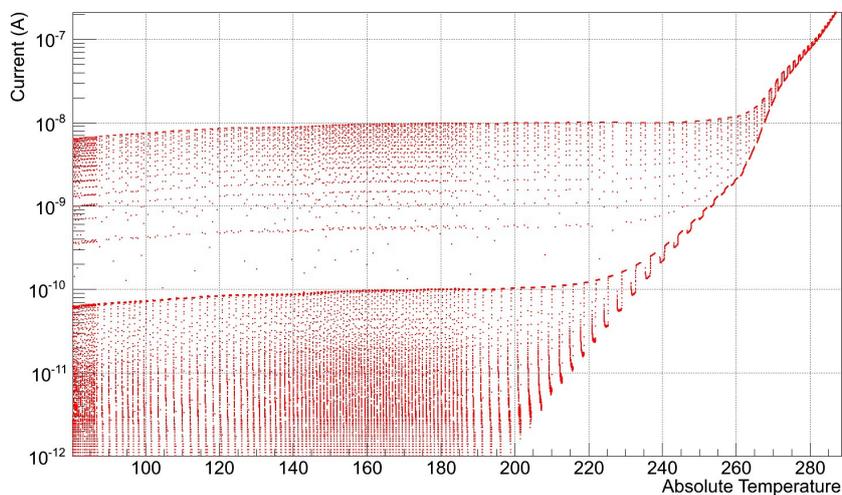


Figura 3.12: Andamento della corrente dell'APD durante i cicli di misura della RQE.

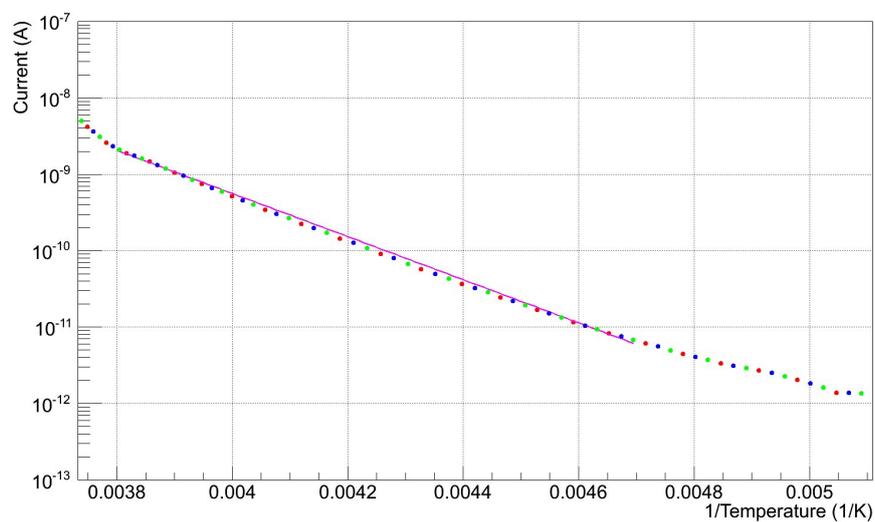


Figura 3.13: Corrente di buio (punti sperimentali e punti ricavati mediante interpolazione) dell'APD in funzione dell'inverso della temperatura.

Per verificare che il metodo utilizzato per la determinazione della fotocorrente fosse sufficientemente accurato, abbiamo fatto un grafico della corrente di buio in funzione dell'inverso della temperatura, graficando contemporaneamente le correnti effettivamente misurate e quelle ottenute tramite interpolazione. Ci aspettiamo che l'andamento sia quello dato dalla formula [5]

$$I_D \propto e^{-E_{gap}/\eta kT}$$

dove k è la costante di Boltzmann e η è un coefficiente che tiene conto di effetti non ideali.

In Figura 3.13 vediamo che il logaritmo della corrente di buio in funzione dell'inverso della temperatura ha un andamento sostanzialmente lineare su circa tre decadi. Facendo un fit si ottiene la pendenza della retta; inserendo i valori di k ($8.617 \cdot 10^{-5}$ eV/K) e E_{gap} (1.12 eV a temperatura ambiente) si ottiene $\eta \approx 2$. Il valore trovato per il coefficiente η è coerente con ciò che è noto dalla fisica dei semiconduttori.

I risultati in Figura 3.14 mostrano innanzitutto che la risposta dell'APD è sostanzialmente la stessa in corrispondenza di diverse intensità luminose, fino a temperature prossime a 240 K. A temperature superiori e con basse intensità luminose è difficile misurare la fotocorrente, che è piccola e sovrapposta ad una importante corrente di buio.

Si osserva inoltre una progressiva diminuzione della fotocorrente (Figura 3.15): a circa 80 K essa è circa il 60% di quella misurata a temperatura ambiente; intorno ai 18 K, una rapida transizione porta la RQE a circa il 40%. Quest'ultima poi, si mantiene approssimativamente costante fino a 1.7 K.

Poiché la sonda di temperatura non è in contatto diretto con l'APD, bensì col suo supporto, non siamo in grado di stabilire l'esatta temperatura del rivelatore quando avviene questa brusca riduzione di efficienza quantica. L'errore sulla RQE rappresenta una stima degli effetti sistematici riscontrati nel nostro set-up; la non perfetta conoscenza della temperatura dell'APD è stata considerata introducendo un errore di ± 1 K nei punti sperimentali.

Fenomeni analoghi sono stati precedentemente osservati in misure di RQE su APD simili a quello da noi utilizzato [8], dove la RQE si riduce

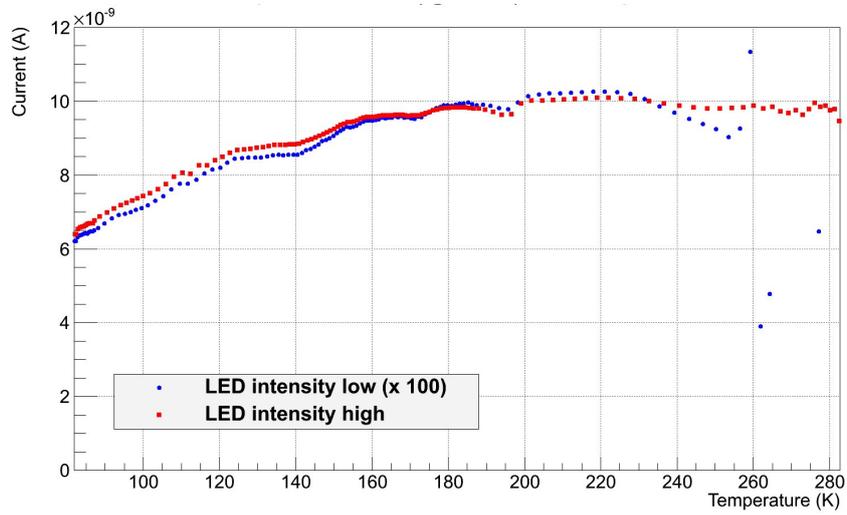


Figura 3.14: RQE dell'APD con $V_{bias} = 200$ V e due diverse intensità luminose.

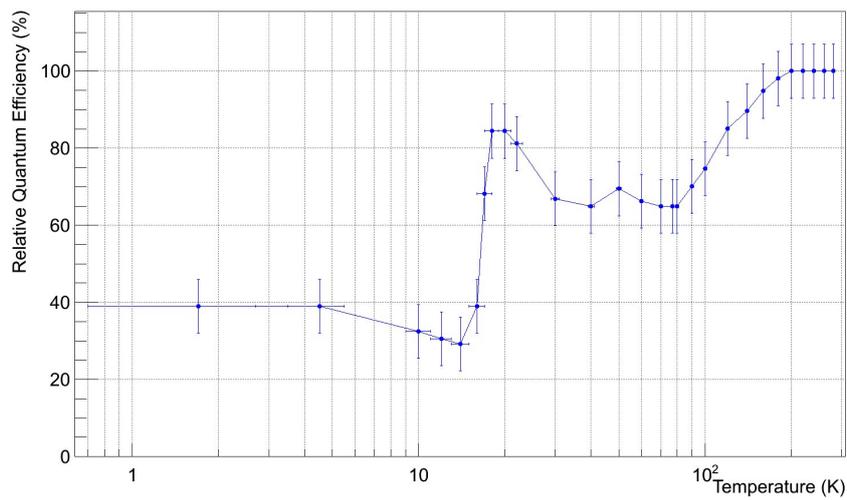


Figura 3.15: RQE dell'APD con $V_{bias} = 200$ V al variare della temperatura.

fino al 15% dopo una rapida transizione intorno ai 40 K. Tuttavia non conosciamo una spiegazione teorica esaustiva alla riduzione efficienza quantica.

Capitolo 4

Lettura di segnali provenienti dall'APD

Nei capitoli precedenti abbiamo caratterizzato il funzionamento dell'APD in continua. Volendo utilizzare il rivelatore per la lettura della luce di scintillazione proveniente da un cristallo, è necessario mettere a punto una catena elettronica per processare il segnale in uscita dall'APD.

In questo capitolo viene descritto uno studio preliminare su una possibile catena di lettura dell'APD.

4.1 Catena elettronica di lettura per segnali di carica

Generalmente, quando si ha la necessità di leggere segnali provenienti da rivelatori, la catena di lettura comprende un primo stadio di amplificazione della carica seguito da un formatore (*shaper*).

4.1.1 Il preamplificatore di carica

Il preamplificatore di carica integra il segnale in corrente proveniente dal rivelatore fornendo in uscita un segnale in tensione con ampiezza proporzionale alla carica in ingresso.

Dal punto di vista circuitale è costituito essenzialmente da un amplificatore operazionale in configurazione invertente e da altri tre elementi:

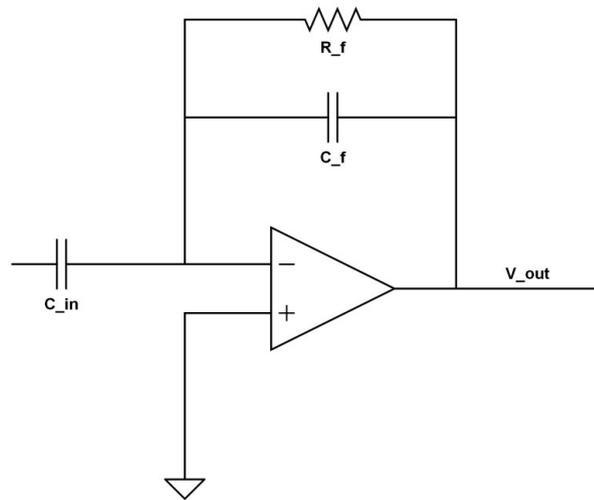


Figura 4.1: Preamplificatore di carica.

1. la capacità di ingresso C_{in} : evita che eventuali offset vengano integrati. La presenza di questa capacità realizza l'accoppiamento AC del preamplificatore;
2. la capacità di feedback C_f : realizza di fatto l'integrazione del segnale in corrente;
3. la resistenza di feedback R_f : permette alla capacità di feedback, che si carica all'arrivo del segnale, di scaricarsi in un tempo pari al tempo caratteristico $\tau = R_f C_f$, riportando così il circuito nelle condizioni di poter effettuare una nuova integrazione del segnale in ingresso. Se tale resistenza non ci fosse il sistema saturerebbe dopo poche integrazioni successive. È posta in parallelo alla capacità di feedback.

4.1.2 Lo shaper

Lo shaper ha lo scopo principale di definire la durata del segnale e filtrare buona parte delle frequenze dovute al rumore, restituendo in uscita un impulso in tensione la cui forma ottimizza il rapporto segnale/rumore.

4.2 Realizzazione della catena elettronica di lettura

4.2.1 Descrizione del set-up

La catena di lettura dell'APD è stata realizzata come segue:

- circuito di preamplificazione: n-Channel JFET 2SK152 e amplificatore di carica AMPTEK mod. A250 [6];
- shaper: Ortec mod. 572 (fornisce in uscita un segnale di forma semi-gaussiana);
- capacità e resistenza di feedback ¹: rispettivamente 0.5 pF e 10 GΩ.

4.2.2 Considerazioni sul rumore

Quando si usa l'A250 come preamplificatore per segnali provenienti da un rivelatore a stato solido, il rumore può essere espresso come segue [6]:

$$N_{tot}^2 = N_i^2 + N_c^2$$

- N_i è il contributo al rumore dovuto alla corrente di buio del rivelatore;
- N_c è il contributo al rumore dovuto alla capacità e alla resistività del rivelatore, alla capacità dei cavi e alle capacità parassite.

La corrente di perdita, e conseguentemente il rumore che essa causa, può essere ridotto facendo lavorare il rivelatore a basse temperature.

4.2.3 Lettura di segnali a temperature criogeniche

Quando si vuole raffreddare il rivelatore, come nel nostro caso, è consigliabile porre anche il FET alla stessa temperatura, infatti la trasconduttanza del FET aumenta al diminuire della temperatura e questo contribuisce all'aumentare del rapporto segnale/rumore.

La condizione di lavoro migliore si ha quando il FET è il più vicino

¹L'A250 ha al suo interno un circuito di feedback che però non sfrutteremo perchè la resistenza di feedback è troppo piccola.

possibile all'A250, ma poichè quest'ultimo non può essere portato a temperature inferiori a -55 C si deve separare il circuito in due parti [6].

Le due metà del circuito devono essere collegate tra loro tramite dei cavi coassiali non terminati, la cui lunghezza dipende dalle caratteristiche del circuito, ma in genere può raggiungere fino a due metri. Un cavo collega il drain del FET all'A250 e un altro collega l'uscita dell'amplificatore al gate del FET tramite il circuito di feedback (Figura 4.2).

La messa a punto di un circuito di questo tipo è delicata; infatti nella fase di assemblaggio, bisogna fare particolare attenzione alla schermatura e la messa a massa. Inoltre trasportare un segnale relativamente piccolo attraverso cavi coassiali relativamente lunghi potrebbe far aumentare il rumore, peggiorando drasticamente le caratteristiche del circuito.

La parte di circuito che verrà messa a freddo comprende (Figura 4.3 e 4.4):

- l'APD;
- il FET;
- il circuito di feedback.

La parte che invece sarà a temperatura ambiente comprende (Figura 4.5):

- l'A250 e il suo alimentatore;
- lo shaper.

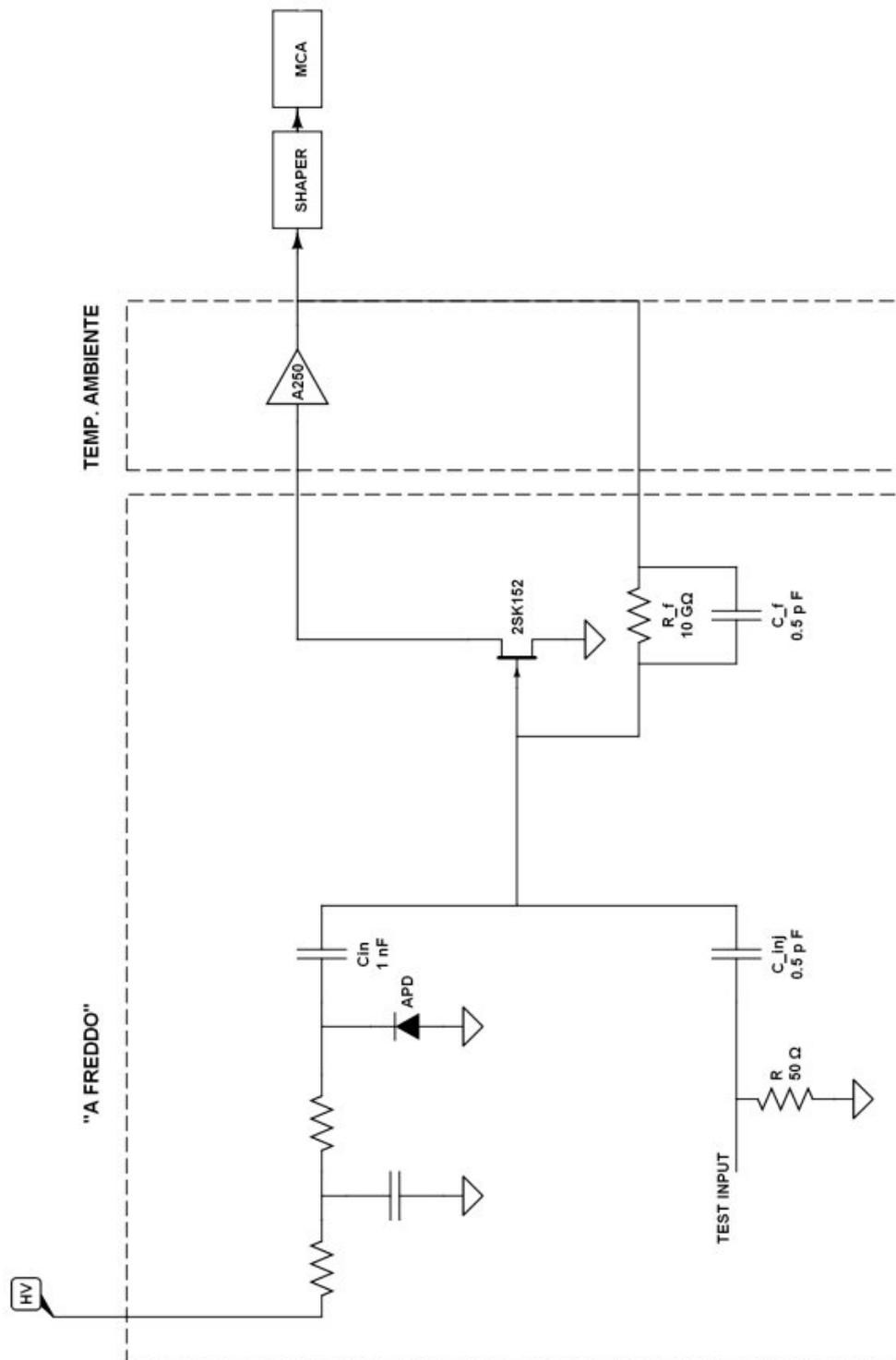


Figura 4.2: Schema circuitale della catena di lettura dell'APD.

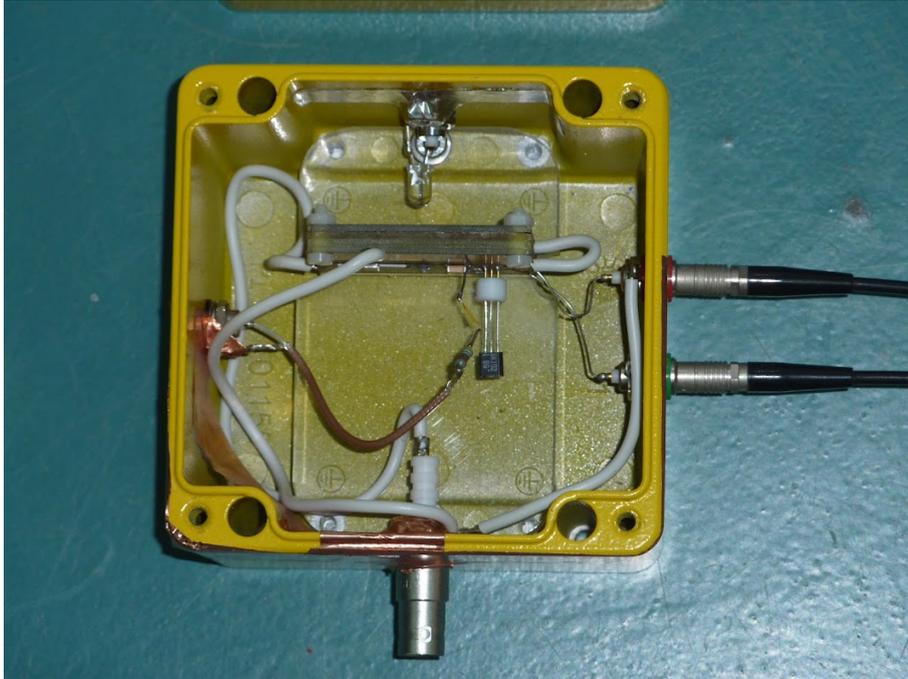
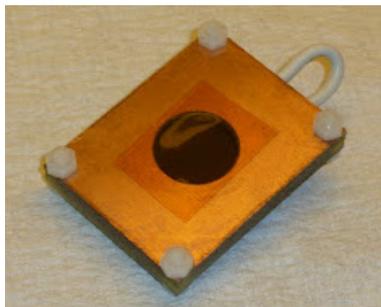


Figura 4.3: APD, FET e rete di feedback.



(a) *Supporto dell'APD.*



(b) *Elementi circuitali.*

Figura 4.4: Dettaglio del circuito mostrato in 4.2 che verrà messo a freddo.



Figura 4.5: A250.

4.2.4 Calibrazione della catena di lettura

La calibrazione di una catena di lettura di questo tipo permette di stabilire a quanta carica in ingresso corrisponde il segnale in tensione all'uscita. Si esegue iniettando dei segnali di carica nota e osservando l'ampiezza dei segnali in uscita dallo shaper.

La catena di amplificazione è stata calibrata sfruttando l'ingresso di test dell'A250. Un impulsatore Tektronik mod. AFG 3252 produce un gradino di tensione di ampiezza regolabile che viene inviato sul gate del FET tramite un attenuatore della HP mod. 355D.

L'attenuatore è stato inserito nel circuito essenzialmente per due motivi:

1. il minimo segnale in tensione che esso fornisce è 50 mV, ma per i nostri scopi serve iniettare segnali con ampiezza di qualche mV;
2. a parità di tensione un segnale di grande ampiezza attenuato è meno rumoroso di uno di piccola ampiezza non attenuato (verificato con un oscilloscopio).

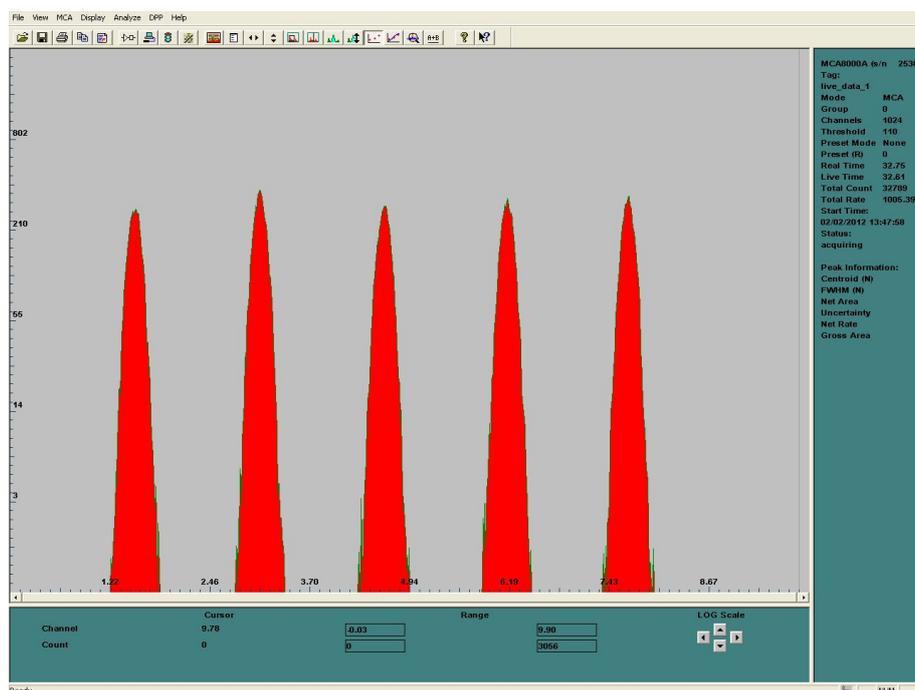


Figura 4.6: Spettro di cinque segnali di calibrazione: 1.58 fC, 3.16 fC, 4.75 fC, 6.33 fC, 7.91 fC.

Superato lo stadio di preamplificazione, il segnale arriva allo shaper. L'output dello shaper viene poi inviato ad un analizzatore multicanale (MCA Amptek mod. 8000A) il quale, per un dato tempo di acquisizione, istogramma i segnali in ingresso. Variando la tensione iniettata si ottengono curve di forma simile, ma traslate sull'asse dei canali.

A titolo di esempio, si riporta in Figura 4.6 la schermata di acquisizione del multicanale corrispondente a cinque diversi segnali iniettati.

Poiché la tensione proveniente dall'impulsatore è nota, siamo in grado di calcolare facilmente la carica corrispondente usando la formula

$$Q = C_{inj} \cdot V$$

dove Q è appunto la carica iniettata, C_{inj} è la capacità di iniezione che nel nostro caso vale 0.5 pF e V è la tensione in ingresso.

Poiché la relazione che intercorre tra la carica iniettata e la tensione in ingresso (espressa in canali) è generalmente lineare, prendendo cinque punti possiamo verificarlo. Sfruttiamo i segnali iniettati per fare un fit e ricavare la retta di calibrazione. A questo punto, nota la pendenza di

tale retta, siamo in grado di dire a quanta carica corrisponde una data tensione in ingresso.

4.3 Misure di rumore

4.3.1 Metodo di misura

Una volta eseguita la calibrazione, stimare il rumore è semplice: con l'aiuto del MCA si misura la larghezza a mezza altezza (FWHM) delle curve corrispondenti a ciascun impulso espressa in canali e, sfruttando la calibrazione, si converte in unità di carica. Per convenzione il rumore si esprime in ENC (Equivalent Noise Charge) ovvero come il numero di elettroni che, se presenti in ingresso, produrrebbero un segnale di carica equivalente al rumore misurato. Il passaggio da FWHM, espressa in unità di carica, a ENC si ottiene nel modo seguente:

$$\text{ENC}[e^- \text{ rms}] = \frac{\text{FWHM}[\text{fC}]}{2.35} \cdot 6250$$

dove 6250 è il numero di elettroni corrispondenti ad un fC.

4.3.2 Rumore dell'elettronica

La misura è stata effettuata al variare del tempo di shaping (S.T.).

1. A temperatura ambiente la configurazione che consente di avere il rumore minore risulta essere quella in cui S.T. = 0.5 μs . In questa condizione:

$$\text{ENC} = 495 \quad e^- \text{ rms}$$

2. Anche a T = 245 K la condizione di minor rumore si verifica per S.T. = 0.5 μs :

$$\text{ENC} = 433 \quad e^- \text{ rms}$$

Il rumore diminuisce al diminuire della temperatura.

È stata eseguita anche una prova in corrispondenza di T = 237 K; i risultati non mostrano sostanziali differenze da quelli relativi a T = 245 K.

Per confronto, abbiamo fatto una stima di rumore a temperatura ambiente sul circuito originale dell'A250 (Figura 4.7). Il risultato ottenuto



Figura 4.7: Circuito originale dell'A250; il FET è posto in prossimità dell'A250.

($ENC = 390 \text{ e}^- \text{ rms}$ a S.T. = $0.5 \mu\text{s}$) mostra che nel passare dal circuito compatto a quello separato si ha un incremento del rumore di circa il 27%. Questo risultato è più che accettabile considerando i vantaggi che si ottengono ponendo il FET nelle vicinanze del rivelatore.

4.3.3 Rumore dell'APD e dell' elettronica

In questa fase l'APD è montato e viene alimentato con lo stesso generatore di tensione utilizzato in precedenza (Capitolo 2).

Le misure di rumore sono state ripetute, sfruttando il metodo descritto sopra, a diverse temperature, in corrispondenza di diverse tensioni di alimentazione dell'APD e al variare del tempo di shaping.

I risultati in corrispondenza di diverse temperature sono mostrati in Tabella 4.1 e 4.2 e Figura 4.8: a temperatura ambiente il rumore più basso si registra in corrispondenza di $V_{bias} = 1545$ V. Tale valore è oltre il doppio del minimo rumore misurato alla stessa temperatura, ma in assenza dell'APD.

Il motivo per cui il rumore diminuisce progressivamente, nel passare da 100 V a 1545 V, è legato al fatto che man mano che la tensione aumenta, la giunzione si svuota e la capacità del rivelatore diminuisce. Una volta raggiunto il minimo, il rumore tende ad aumentare perchè sul fenomeno di svuotamento prevale l'aumento della corrente di buio dovuto alla moltiplicazione. Osserviamo inoltre che all'aumentare della tensione applicata, per minimizzare il rumore è necessario diminuire il tempo di shaping.

A $T = 245$ K il rumore è contenuto fino a tensioni di 1700 V, in corrispondenza di guadagni di alcune centinaia. Il minimo valore è stato misurato in corrispondenza di $V_{bias} = 1550$ V. Riguardo l'andamento complessivo in funzione della tensione e riguardo il tempo di shaping valgono le stesse considerazioni scritte sopra.

La calibrazione, e conseguentemente le misure di rumore, sono affette da un errore sistematico del $10 \div 20\%$ dovuto soprattutto all'incertezza sul valore effettivo della capacità di iniezione. Si è scelto di non riportare tale errore nei grafici.

Tabella 4.1: Rumore dell'APD e dell'elettronica (espresso in elettroni rms) a 294 K.

S.T. (μ s)	TENSIONE (V)							
	100	500	1000	1200	1545	1677	1785	1823
0.5	2872	1629	1356	1336	1295	1489	2768	5183
1	2186	1423	1348	1370				
2	1755	1363	1855					
3	1665	1390						
6	1665							
10	1851							

Tabella 4.2: Rumore dell'APD e dell'elettronica (espresso in elettroni rms) a 245 K.

S.T. (μ s)	TENSIONE (V)					
	500	1000	1400	1550	1650	1700
0.5	1491	1086	938	914	876	857
1	1078	900	828	774	781	798
2	1045	949	913	881	918	1003
3	1054					

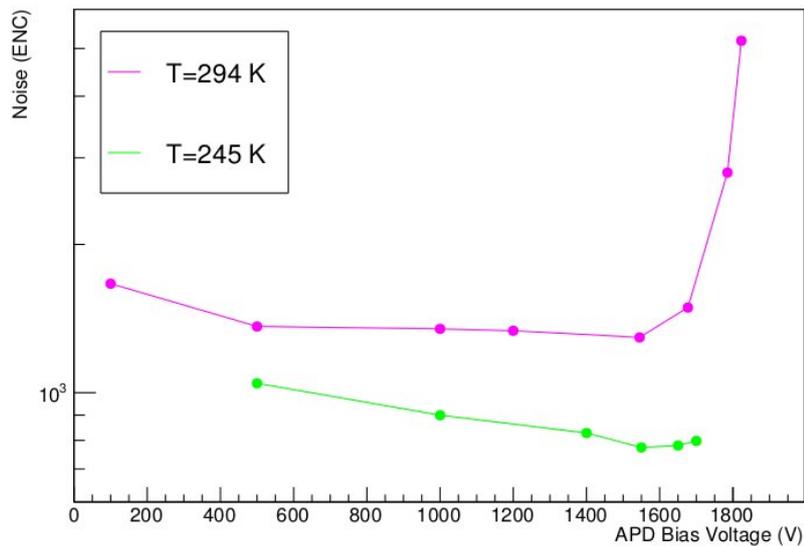


Figura 4.8: Rumore minimo misurato in funzione della tensione di alimentazione dell'APD a diverse temperature.

4.4 Analisi del segnale

In questa fase osserviamo la risposta dell'APD ad un segnale fisico e ne misuriamo il guadagno in funzione della tensione di alimentazione. Coerentemente con le misure precedenti, sarebbe stato interessante osservare la risposta dell'APD a segnali provenienti da LED impulsati. Tuttavia la calibrazione assoluta della quantità di luce proveniente dal LED non è semplice, dunque si è scelto di utilizzare una sorgente di ^{55}Fe posizionata in prossimità del rivelatore stesso.

4.4.1 Metodo di misura

La sorgente di ^{55}Fe emette raggi X da circa 6 keV, che incidono sul silicio liberando un elettrone per effetto fotoelettrico e vari elettroni Auger [7]. Tali elettroni, con energia complessiva molto prossima a quella del fotone X incidente, producono, tramite ionizzazione per impatto, un numero di coppie elettrone-lacuna dato dal rapporto tra l'energia dei raggi X emessi e l'energia media per la produzione di coppie in silicio:

$$\langle n \rangle = \frac{6 \text{ keV}}{3.62 \text{ eV}} = 1657$$

Moltiplicando il numero di coppie prodotte per la carica dell'elettrone ($q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ricaviamo la carica depositata dalla radiazione incidente (Q_{dep})

$$Q_{dep} = 0.265 fC$$

Una volta eseguita la calibrazione della catena di lettura, misuriamo la carica corrispondente al picco di emissione della sorgente. A questo punto possiamo calcolare il guadagno come rapporto tra la carica misurata (Q_{mis}) e la carica depositata dalla radiazione incidente:

$$G = \frac{Q_{mis}}{Q_{dep}}$$

4.4.2 Risultati

Le misure sono state eseguite a temperatura ambiente e a $T = 237 \text{ K}$. In Figura 4.9 è mostrato un tipico spettro di segnale.

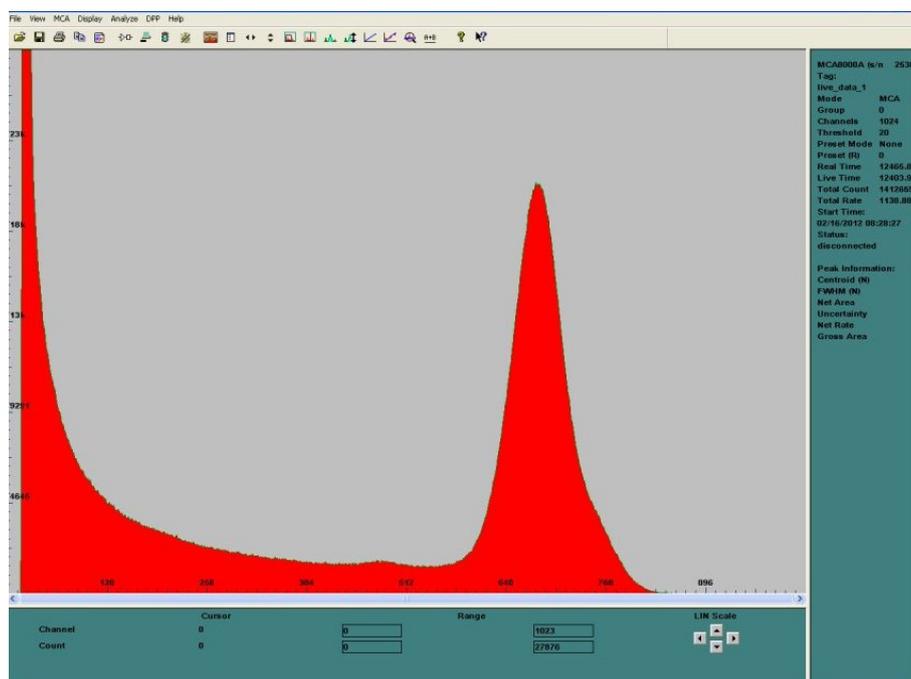


Figura 4.9: Spettro di un segnale di carica proveniente dalla sorgente di ^{55}Fe , $V_{\text{bias}} = 1630 \text{ V}$.

A temperatura ambiente il guadagno misurato con la sorgente di ^{55}Fe è molto simile a quello misurato illuminando l'APD con il LED IR (Figura 4.10). Questo risultato può essere spiegato considerando che la lunghezza media di attenuazione di entrambe le radiazioni è di circa $30 \mu\text{m}$ e il guadagno dipende dalla zona di assorbimento e moltiplicazione della carica (si veda 3.1.3).

Tale risultato mostra inoltre che i diversi metodi utilizzati per la misura del guadagno sono sostanzialmente equivalenti. In questo caso però, il sistema non è sufficientemente sensibile per eseguire misure a guadagni inferiori a 10. Per questo motivo la curva di guadagno è costruita su pochi punti. Confrontando le curve relative a $T = 294 \text{ K}$ e $T = 237 \text{ K}$ (Figura 4.11) osserviamo ancora una volta che, a parità di tensione, il guadagno è maggiore a temperatura più bassa.

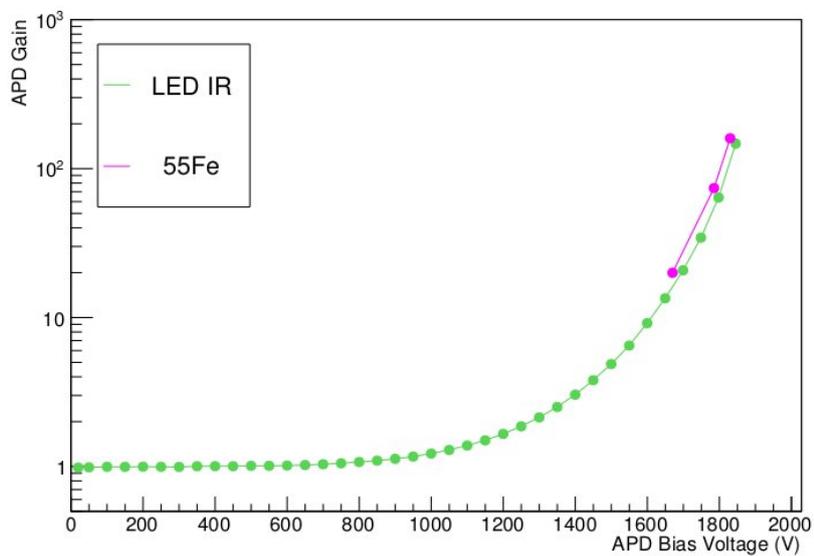


Figura 4.10: Confronto tra i guadagni dell'APD misurati con la sorgente di ^{55}Fe ed il LED IR a temperatura ambiente.

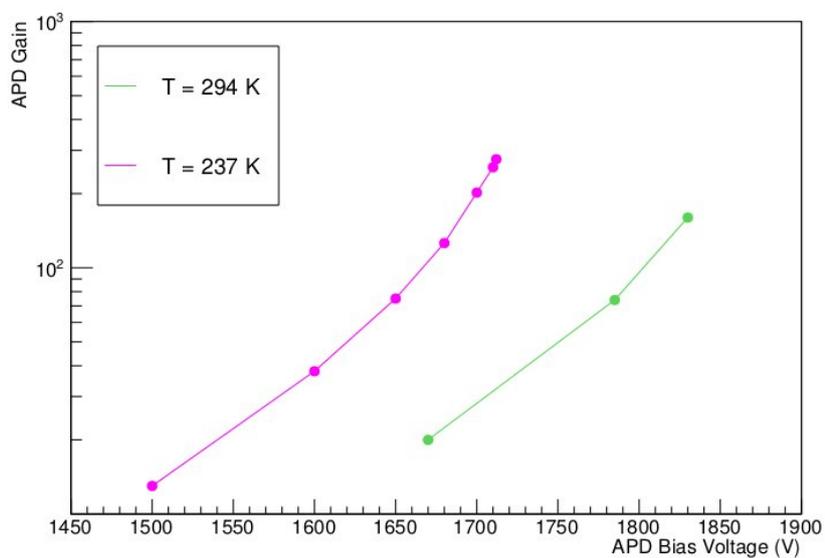


Figura 4.11: Guadagno dell'APD a 294 K e 237 K misurato con la sorgente di ^{55}Fe .

Conclusioni

Le misure in continua condotte sull'APD in esame mostrano che esso funziona correttamente fino a $T = 1.7$ K, sia in vapori che a bagno d'elio. A questa temperatura si raggiungono guadagni dell'ordine di 10^3 con tensioni di alimentazione di circa 1300 V. L'efficienza quantica relativa diminuisce con la temperatura, ma si stabilizza comunque su valori importanti (circa 40%) anche a 1.7 K. Assumendo che l'efficienza quantica a temperatura ambiente sia 80%, tale riduzione porta a valori prossimi al 30% a temperature criogeniche. Questi valori di efficienza quantica sono confrontabili con i valori tipici per i fototubi ($QE = 25\% \div 50\%$).

Le misure preliminari sulle performance di una possibile catena elettronica di lettura che funzioni a temperature criogeniche, necessaria per l'uso dell'APD come rivelatore da accoppiare a degli scintillatori, mostrano che il rumore diminuisce con la temperatura. Il minimo valore misurato è di circa $780 e^-$ rms in corrispondenza di 1550 V di alimentazione dell'APD, a $T = 245$ K. Misure preliminari con APD ed elettronica di lettura mostrano che è possibile rivelare senza ambiguità depositi di carica corrispondenti a 1600 coppie liberate.

Sembra dunque che questo dispositivo possa essere utilizzato in esperimenti criogenici. La possibilità di far lavorare l'APD a bagno d'elio, inoltre, potrebbe semplificare il set-up di un eventuale esperimento nel quale sia i cristalli che l'APD verrebbero immersi in elio.

Misure successive permetteranno di determinare con maggiore precisione il valore della temperatura al quale avviene la drastica riduzione di efficienza quantica. I prossimi passi porteranno ad uno studio più dettagliato delle performance della catena di lettura e alla determinazione del rapporto segnale/rumore in un range di temperature compreso tra temperatura

ambiente e temperatura dell'elio liquido. Tali misure comporteranno il raffreddamento dell'APD e di una parte della catena elettronica di lettura seguendo la metodologia studiata durante questo lavoro di tesi.

Bibliografia

- [1] B. Babussinov et al., *An active electron polarized scintillating GSO target for neutrino physics*, to be published on Nucl. Instrum. and Meth.
- [2] P. Mocci, *Studio per la realizzazione di un bersaglio attivo polarizzato magneticamente*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Cagliari, A.A. 2010/2011.
- [3] Hamamatsu, *Characteristics and use of Si APD (Avalanche PhotoDiode)*, Technical Information SD-28.
- [4] J. Kataoka, T. Saito et al., *Recent progress of avalanche photodiodes in high-resolution X-rays and γ -rays detection*, Nucl. Instrum. and Meth. A541 (2005).
- [5] S. M. Sze, Kwok K. Ng, *Semiconductor Devices [3rd edition]* Wiley (2007).
- [6] Amptek Inc. *A250 Application notes*.
- [7] G. W. Fraser, A. F. Abbey et al., *The X-Ray energy response of silicon*, Nucl. Instrum. and Meth. A350 (1994).
- [8] L. Yang, S. N. Dzhosyuk, *Performance of a large-area avalanche photodiode at low temperature for scintillation detection*, Nucl. Instrum. and Meth. A508 (2003).

Ringraziamenti

Se sono arrivata fin qui è certamente merito mio, ma anche delle persone che, ognuno a suo modo, hanno contribuito.

Un grazie di cuore va ai miei relatori, Dott. Alessandro Cardini e Dott. Adriano Lai. Grazie per avermi dato la possibilità di lavorare con voi e per avermi insegnato tante cose. Non dimenticherò...

Desidero ringraziare anche Mauro Aresti, Dott. Mura, Dott. Saba e Dott. Quochi per la disponibilità e l'aiuto.

Ringrazio i miei colleghi e amici: Roberto (da quel famoso giorno ai pre-corsi avevo capito che eri una persona speciale), Paoletta, Stuva (prima amico, poi collega), Ila, Lau, Silvia, Sonja e tutti gli altri che non menziono, ma che hanno condiviso con me questa lunga e bellissima avventura.

Grazie a te Cesco, amico mio. Anche se un mare tenta di separarci noi siamo più forti e restiamo uniti! Ti voglio bene e ti ringrazio per la stima che hai di me... e per le risate che sappiamo farci, anche per cose stupide!

Un ringraziamento speciale va a te Simo. A te che sei sempre lì, a te che credi in me più di quanto io stessa sia in grado di fare. Grazie di esserci.

Grazie alla mia splendida famiglia: a Miky, perché sei come una sorella per me e se non ci fossi non sarebbe lo stesso; a Zia Meri, perché altrimenti chi mi avrebbe detto "Su Muffi meno zero!"; a Franco, per il tuo grande cuore; al Pulci, che ha dato un notevole contributo presenziando

durante lo studio; a Zia Mimma, perché senza il tuo aiuto sarebbe stato tutto più complicato; a Treccio, per l'utilissimo supporto più tecnico che morale...

Il GRAZIE più grande, va alla mia Mamma. Senza di te non ce l'avrei fatta Mami, ed è per questo che voglio dedicarti questo lavoro di tesi. Grazie per avermi sempre appoggiata, per avermi consolata quando credevo di non farcela, per esserci sempre come sai fare tu.

È grazie a tutti voi se oggi sono la persona che sono e se, dovunque mi troverò nel mondo, non potrò mai sentirmi sola.