

LNF-04/030 (IR)
22 Dicembre 2004

**CARATTERIZZAZIONE DI UN FOTOCONDUTTORE
BASATO SU SINGOLO CRISTALLO DI DIAMANTE 1B
MEDIANTE LUCE DI SINCROTRONE**

E. Burattini^{1,2}, A. De Sio³, F. Malvezzi¹, A. Marcelli², F. Monti¹, E. Pace^{3,4}

- 1) *Dipartimento di Informatica, Università di Verona, Strada Le Grazie 15
37134 Verona, Italy*
- 2) *Laboratori Nazionali di Frascati, INFN, 00044 Frascati, Roma, Italy*
- 3) *Dipartimento Astronomia e Scienza dello Spazio, Università di Firenze,
L.go E. Fermi 2, 50125 Firenze, Italy*
- 4) *INFN, Sezione di Firenze, v. G. Sansone 1, Sesto Fiorentino, Firenze, Italy*

Abstract

Questo rapporto mostra i risultati di alcune misure di calibrazione di rivelatori UV basati su film di diamante sintetico, utilizzando il setup esistente sul canale di luce di sincrotrone DXR-2 disponibile presso il Laboratorio DAΦNE-L dei Laboratori Nazionali di Frascati. Lo scopo di queste misure è effettuare una valutazione del funzionamento e delle caratteristiche della beamline, in relazione alla possibilità di trasformare la strumentazione della linea stessa e adattarla alle necessità sperimentali per fare misure di test e caratterizzazione di rivelatori e sistemi ottici nelle bande spettrali che vanno dall'UV da vuoto al vicino IR. I risultati mostrano i limiti attuali della beamline per l'uso sull'intervallo desiderato, ma al contempo evidenziano le potenzialità della luce di sincrotrone per la caratterizzazione di rivelatori, potenzialità del resto già note.

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito di una collaborazione tra i Laboratori Nazionali di Frascati e il Dipartimento di Astronomia e Scienza dello Spazio dell'Università di Firenze è stato deciso di effettuare alcune misure di calibrazione di rivelatori UV basati su film di diamante sintetico, utilizzando il setup esistente sul canale di luce di sincrotrone DXR-2 disponibile presso il Laboratorio DAΦNE-L dei Laboratori Nazionali di Frascati. Questo canale consente di utilizzare un intenso flusso di radiazione UV predisposto per esperimenti di fotobiologia, ovvero esposizioni calibrate e omogenee entro il 10%, su aree di circa 13 mm di diametro. Queste misure sono state pianificate per verificare le potenzialità di questa sorgente impiegata per effettuare test e calibrazioni di rivelatori nella regione dell'UV e del visibile. Si è caratterizzato un dispositivo prototipo costruito su singolo cristallo di diamante sintetico, intrinsecamente sensibile solo alla radiazione dell'UV da vuoto (VUV) – in particolare a $\lambda < 225$ nm – permettendo quindi di esaminarne sia la sensibilità al VUV che il fattore di reiezione del segnale quando illuminato con radiazione ad energia inferiore.

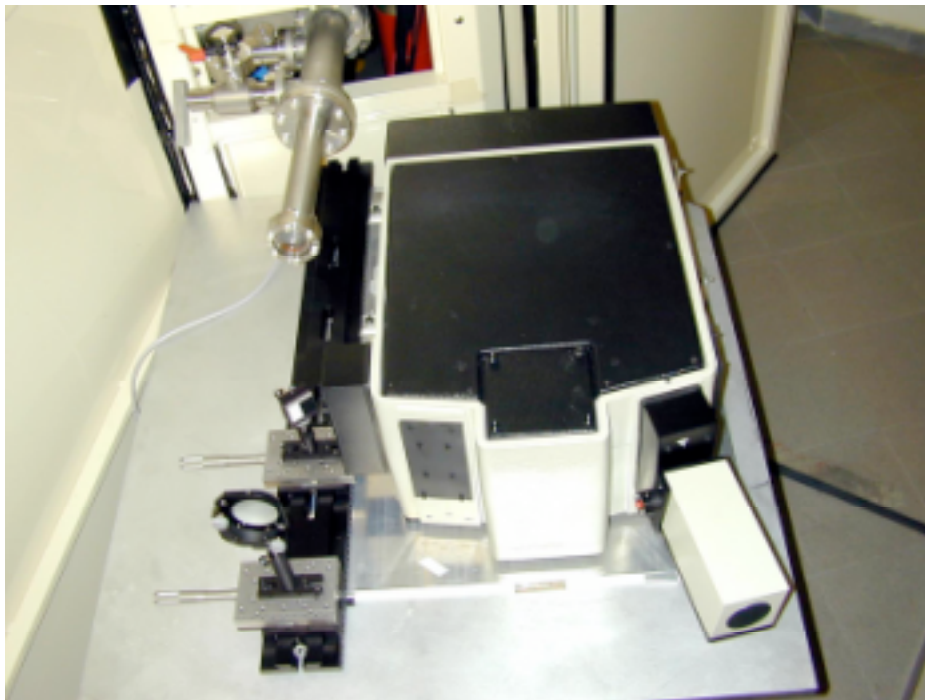


FIG1. Monocromatore Jobin-Yvon collocato sulla linea DXR-2.

2 SETUP STRUMENTALE

La linea di luce di sincrotrone DXR-2, dell'acceleratore DAΦNE, raccoglie un intenso flusso di radiazione con energie che vanno da 1.55 eV (in questa regione limitato dal piccolo angolo solido di raccolta) fino a circa 1 keV, energia limite determinata dalla riflessione totale su uno specchio ricoperto d'oro a circa 2.2° . L'ampiezza dell'intervallo spettrale è tuttavia limitata dal cammino ottico e da una finestra posta al termine del canale di trasporto. Il fascio di luce bianca, infatti, esce dalla linea di vuoto attraverso una finestra di zaffiro – non trasparente a $\lambda < 190$ nm – di 38 mm di diametro e 2 mm di spessore, dopo di che si propaga in aria, compiendo alcune riflessioni normali su due specchi ricoperti di alluminio che focalizzano il fascio sulle fenditure di ingresso di un monocromatore. Quest'ultimo (Jobin-Yvon, mod. HR460MST2-2XM) ha montatura Czerny-Turner, apertura $f/5.3$ e lunghezza focale 460 mm; inoltre è equipaggiato con

un reticolo olografico da 2400 linee/mm di area $76 \times 76 \text{ mm}^2$ ed è ottimizzato a 250 nm, il che consente di lavorare nell'intervallo 200-600 nm con risoluzione 0.1-0.3 %.

Alla fenditura d'uscita, la cui apertura è regolabile da 0 a 3 mm, abbiamo posto un rivelatore basato su diamante per misurarne la risposta spettrale foto-conduttiva assoluta e per valutarne la linearità. Per questa sessione di misure abbiamo scelto di utilizzare la radiazione nell'intervallo spettrale 200-480 nm, giacché esso è a cavallo dell'energia della banda proibita del diamante.

Date le piccole dimensioni del dispositivo da esaminare ($2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$), si è deciso di limitare le dimensioni del fascio applicando, sulla fenditura di uscita del monocromatore, un diaframma di 1.5 mm di diametro. Così facendo, il diametro dello spot sul rivelatore era di circa 3 mm, rendendo semplice la stima del rapporto d'area tra fascio e rivelatore per la misura assoluta.

3 TARATURA DEL FASCIO

Per conoscere la distribuzione spettrale della radiazione in uscita dal sistema DRX-2 + monocromatore, abbiamo effettuato delle misure preliminari utilizzando un fotodiodo calibrato nella regione 200-800 nm. Il segnale in corrente del fotodiodo è stato prelevato da un amplificatore corrente-tensione Keithley (guadagno fino a 10^9 V/A) e poi letto con un multimetro digitale.

Innanzitutto abbiamo verificato l'andamento del flusso F misurato dal fotodiodo alla lunghezza d'onda di 210 nm in funzione della corrente accumulata I_{sync} . Si ottiene che $F(I_{\text{sync}})$ ha un comportamento lineare (vedi Fig. 2). Nella tabella che segue sono riportati i parametri del fit lineare, con un errore stimato sul valore del flusso legato all'incertezza sull'ultima cifra significativa del multimetro digitale ($\pm 0.1 \text{ mV}$).

Abbiamo poi misurato due volte lo spettro d'intensità della sorgente in funzione della lunghezza d'onda (vedi Fig.3), prima e dopo le misure sul dispositivo.

Durante la misura dello spettro, però, l'intensità luminosa diminuisce in misura proporzionale alla corrente che circola nella macchina; abbiamo perciò sfruttato la linearità della relazione corrente-flusso per normalizzare il flusso ad un valore di corrente di 750 mA per ogni lunghezza d'onda. Questo valore è stato scelto in quanto le correnti variavano in un intervallo di valori tra 600 e 900 mA. Abbiamo inoltre verificato che le due misure fossero confrontabili: la differenza risulta compresa tra il 3% ed il 5%.

TAB. 1: Parametri del fit lineare dei dati del flusso misurato dal fotodiodo in funzione della corrente nell'anello di accumulazione: $F = A + B \cdot I_{\text{sync}}$

Parametro	Valore	Errore
A	$4.91248 \cdot 10^9$	$1.65122 \cdot 10^8$
B	$1.85868 \cdot 10^8$	$2.83056 \cdot 10^6$

R	SD	N	P
0.99988	$3.3272 \cdot 10^8$	104	< 0.0001

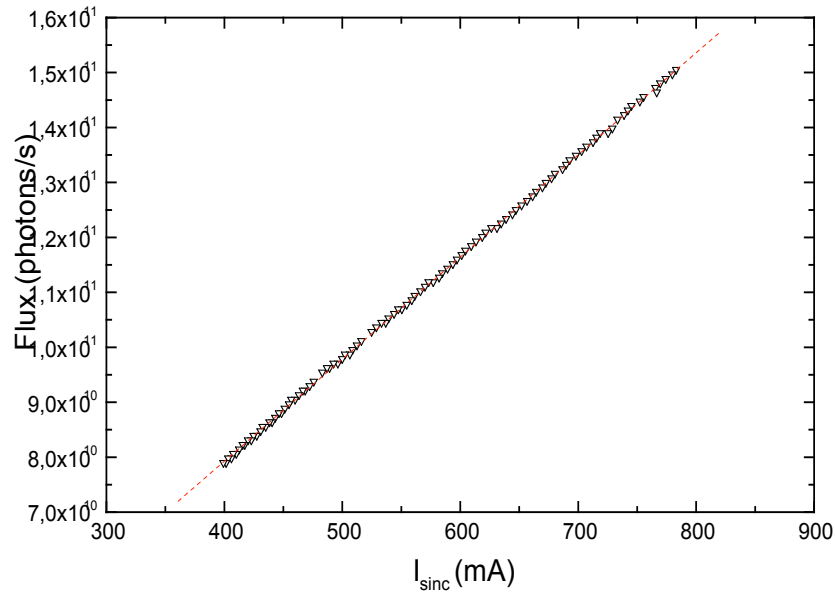


FIG 2. Flusso di fotoni in uscita dal monocromatore a 210 nm in funzione della corrente accumulata. La retta tratteggiata è il fit lineare dei dati, i cui parametri sono riportati in Tab. I.

4 TEST DEL DISPOSITIVO AL DIAMANTE

Il dispositivo esaminato consiste in un fotoconduttore basato su un singolo cristallo di diamante 1b di $4 \times 4 \times 0,3 \text{ mm}^3$. È stato realizzato depositando sulla superficie (100) del cristallo una coppia di contatti elettrici planari interdigitati in oro di area $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$. La distanza che separa i due contatti è $20 \mu\text{m}$.

Il rivelatore è stato montato dopo la fenditura d'uscita del monocromatore con la superficie sensibile normale alla direzione del fascio uscente, nella stessa posizione del fotodiode usato per la calibrazione, in modo che lo spot di radiazione fosse centrato sull'area sensibile.

Lo scopo di questo test è stato determinare la risposta spettrale del dispositivo. Abbiamo quindi misurato la fotocorrente variando la lunghezza d'onda e applicando ai due elettrodi una tensione di 10 V ($0,5 \text{ V}/\mu\text{m}$). Il campo, minore di quello tipico ($\geq 1 \text{ V}/\mu\text{m}$), è stato scelto per mantenere basso il livello della corrente di buio, che in aria è molto più elevato rispetto a quando viene posto in vuoto.

Poiché la corrente che circolava nell'anello di accumulazione diminuiva durante la misura, e con essa anche il flusso incidente, abbiamo rinormalizzato lo spettro per ottenere i valori corretti di efficienza quantica esterna (rapporto tra il numero di elettroni raccolti ed il numero di fotoni incidenti, moltiplicato per il guadagno fotoconduttivo), stimando il flusso incidente ad ogni lunghezza d'onda a partire dai valori di corrente nell'anello di accumulazione.

L'analisi dello spettro, riportato in Fig.4, ha messo in evidenza due risultati. Innanzitutto è stato possibile misurare, tra 200 e 270 nm, la netta diminuzione della risposta del rivelatore in corrispondenza dell'energia di gap del materiale. Infatti la banda proibita del diamante ha un'ampiezza di 5,5 eV e quindi, quando un fotone con minore energia (ovvero $\lambda > 225 \text{ nm}$) incide sulla sua superficie, la probabilità che esso venga assorbito e generi una coppia e^-/h^+ decresce in modo esponenziale.

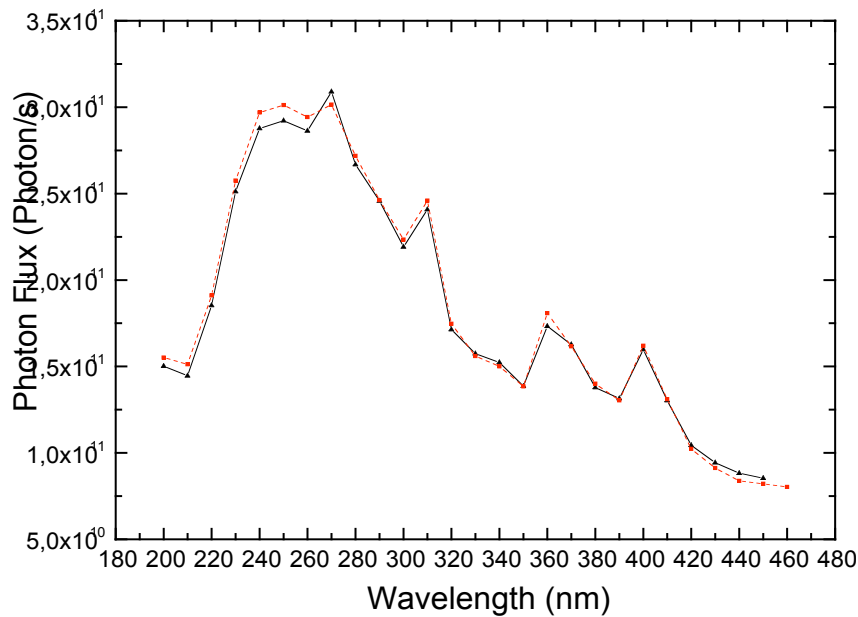


FIG 3. Distribuzione spettrale dell'intensità della sorgente di luce rinormalizzata ad una corrente di 750 mA. Le due curve, a tratto continuo e tratteggiato, sono relative a due diverse misure.

Inoltre abbiamo evidenziato una larga banda che presenta un eccesso di fotocorrente nella regione spettrale compresa tra 380 nm e 480 nm. L'analisi di questa banda ha chiarito che l'eccesso è dovuto al contributo del secondo ordine del monocromatore. Infatti, ci si aspetta in primo luogo che il diamante non sia sensibile a radiazione con queste lunghezze d'onda; inoltre il profilo tra 420 nm e 480 nm presenta lo stesso andamento di quello tra 200 nm e 240 nm. Infine, il fronte di salita di questo segnale viene osservato intorno a 380 nm: un valore doppio della lunghezza d'onda di taglio del sistema (190 nm) legata alla finestra di zaffiro.

Questo segnale spurio dev'essere eliminato – usando ad esempio un filtro per lunghezze d'onda inferiori a 280 nm – quando si vuole osservare la regione a lunghezze d'onda superiori a 360 nm.

Successivamente abbiamo verificato l'andamento della risposta del campione in funzione del flusso incidente, sebbene questo sia variato solo di un fattore 2 circa. Abbiamo quindi campionato simultaneamente le due quantità per poi riportarle nel grafico in Fig.5. Il valore di F è stato ricavato misurando contemporaneamente la corrente I_{sync} e la fotocorrente dal fotodiode, ottenendo poi il valore del flusso dai due grafici ricavati con la taratura iniziale, nell'ipotesi che la linearità fosse la stessa a tutte le lunghezze d'onda, riscalata per il valore del flusso. La misura è stata eseguita a 210 nm, per confrontare il risultato con quello già ottenuto usando il fotodiode, e a 400 nm, nella regione di seconda armonica. Quest'ultima misura ha interesse solo per valutare la linearità del dispositivo e la precisione della misura dell'efficienza quantica, in quanto è ovvio che la stima dei valori di efficienza nella banda di seconda armonica non è corretta.

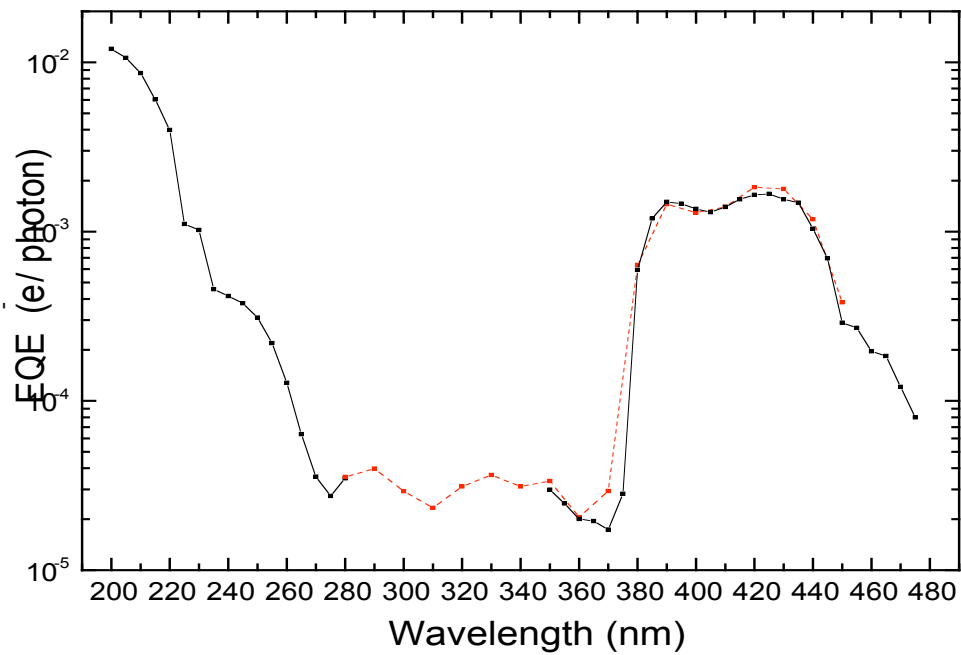


FIG 4. Spettro di efficienza quantica esterna, ovvero il prodotto tra efficienza quantica del processo di foto-generazione delle cariche e guadagno fotoconduttivo, del rivelatore a diamante. Le due curve, a tratto continuo e tratteggiato, sono relative a due diverse misure.

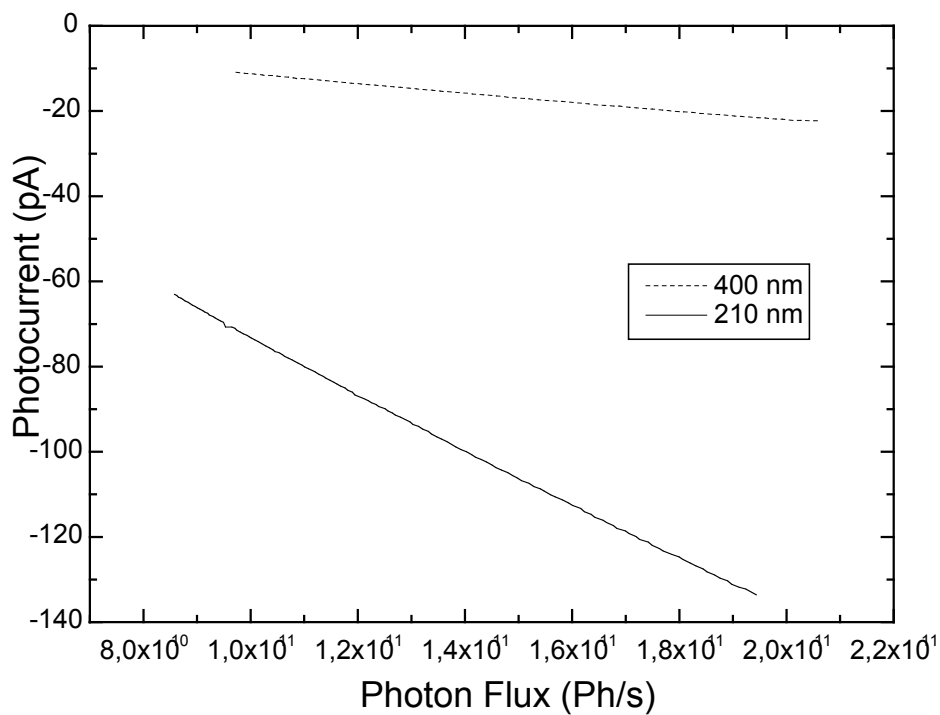


FIG 5. Risposta del campione in funzione della variazione del flusso incidente.

Come si può notare in Fig.5, i due andamenti sono lineari, ma non hanno lo stesso coefficiente angolare, perché la relazione che lega la fotocorrente PC al flusso incidente F è la seguente:

$$PC = P_{Co} + A \cdot F = P_{Co} + \eta q (A_d / A_s) F$$

dove si è indicato con η l'efficienza quantica esterna, q la carica elettrica e (A_d / A_s) il rapporto tra le aree dei contatti sul diamante e dello spot di luce. Il coefficiente angolare dipende allora dal valore dell'efficienza quantica. Il termine P_{Co} rappresenta la fotocorrente per $F = 0$ ph/s, ovvero il valore della corrente di buio. Se eseguiamo il fit lineare dei dati relativi alle due misure, otteniamo per i parametri i valori riportati in Tab.II.

Nel caso dei fotoni a 210 nm, il coefficiente angolare vale $A = 6.513 \cdot 10^{-22}$ e stimando che $(A_d / A_s) \sim 0.5$ si ricava $\eta = 0.00813$. Questo valore, confrontato con $\eta = 0.00863$ ottenuto dalla misura diretta, indica che i due metodi indipendenti forniscono valori di η che differiscono meno del 6%. Per ottenere una conferma della precisione, stimiamo il valore di η anche dalla relazione $PC(F)$ a 400 nm. Si ha che $A = 1.084 \cdot 10^{-22}$, dal quale si ricava $\eta = 0.00135$. Il valore ottenuto dalla misura diretta è $\eta = 0.00129$ che si discosta del 4.5% da quello ricavato con il fit. Questo confronto fornisce anche una conferma indiretta della bontà dell'ipotesi fatta inizialmente sulla linearità a tutte le lunghezze d'onda della funzione $F(I_{sinc})$.

TAB. 2: Parametri del fit lineare dei dati della fotocorrente in funzione del flusso di fotoni

(210nm)		
Parametro	Valore	Errore
P _{Co}	$-8.14141 \cdot 10^{-12}$	$1.7587 \cdot 10^{-13}$
A	$-6.51315 \cdot 10^{-22}$	$1.30468 \cdot 10^{-24}$

R	SD	N	P
-0.99974	$4.7712 \cdot 10^{-13}$	131	< 0.0001

(400nm)		
Parametro	Valore	Errore
P _{Co}	$-5.3603 \cdot 10^{-13}$	$4.733 \cdot 10^{-14}$
A	$-1.08416 \cdot 10^{-22}$	$3.23495 \cdot 10^{-25}$

R	SD	N	P
-0.99941	$1.2172 \cdot 10^{-13}$	135	< 0.0001

5 CALCOLO DELLA LINEARITA'

Abbiamo infine valutato quantitativamente la linearità delle relazioni precedenti, utilizzando la formula:

$$L(\%)=100 [1 - (I \cdot F_m)/(I_m \cdot F)]$$

dove la coppia di valori (F_m, I_m) indica una misura di riferimento che tipicamente viene presa al centro del set di dati. Il risultato dell'elaborazione effettuata sulla relazione $F(I_{\text{sync}})$, ottenuta con il fotodiode durante le misure di taratura, è riportato nel grafico in Fig. 6.

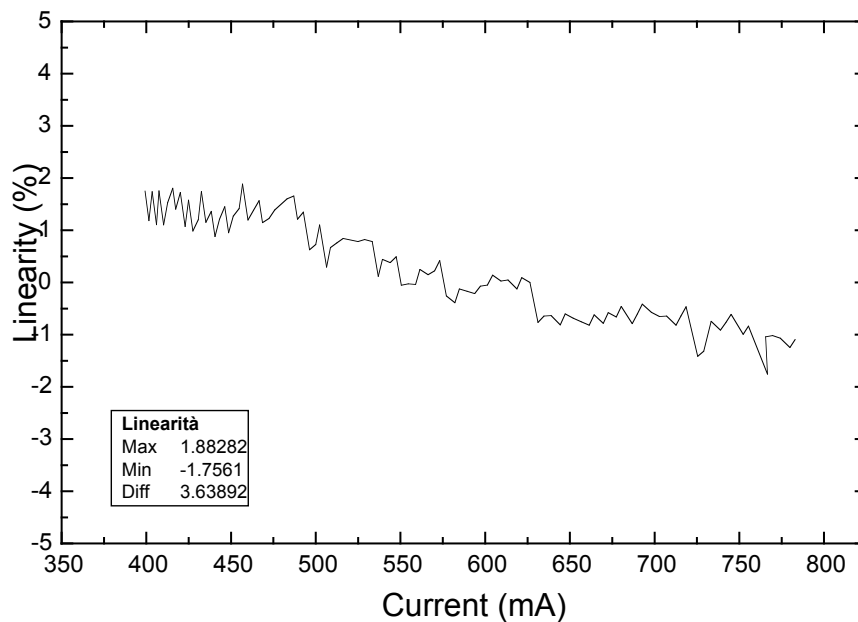


FIG 6. Linearità del flusso misurato dal fotodiode in funzione della corrente nell'anello di accumulazione

Si osserva come i valori sono compresi nell'intervallo $\pm 2.0\%$, confermando la buona linearità del fotodiode.

Le elaborazioni effettuate sulla relazione che lega la fotocorrente PC data dal diamante al flusso incidente F sono invece riportate in Fig.7. In questo caso si ha

$$L(\%)=100 [1 - (PC \cdot F_m)/(PC_m \cdot F)]$$

Le misure mostrano andamenti differenti, con una deviazione dalla linearità del dispositivo a diamante contenuta per entrambe entro $\pm 4\%$.

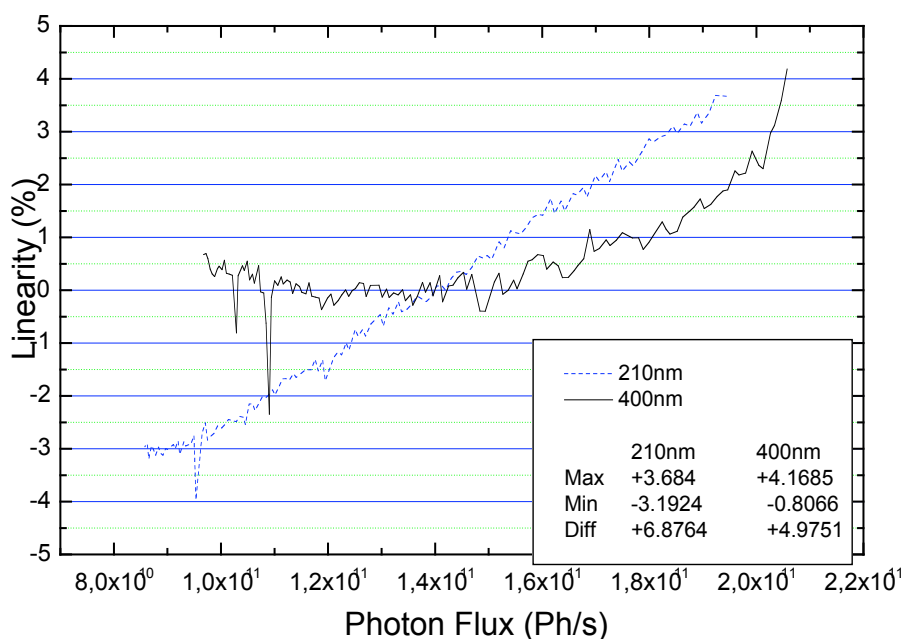


FIG 7. Linearità della risposta in fotocorrente ottenuta dal rivelatore a diamante in funzione del flusso incidente alle lunghezze d'onda di 210 nm e 400 nm.

6 CONCLUSIONI

Le misure effettuate hanno evidenziato che, per estendere il range spettrale potenzialmente disponibile, devono essere eliminati o filtrati i contributi degli ordini superiori del monocromatore, oltre che modificato il cammino ottico in modo che la radiazione in uscita dalla beamline resti in vuoto, dev'essere ridotto il numero delle ottiche a riflessione ed eliminate finestre e ottiche a rifrazione.

Per quanto concerne il fotoconduttore a diamante, è stato possibile misurarne la risposta spettrale assoluta nella regione 200-500 nm, indagarne la rielezione del segnale a radiazione con energia inferiore a quella della banda proibita e verificarne la linearità.

Il flusso di fotoni in uscita dal monocromatore però è influenzato dal contributo del secondo ordine di diffrazione del reticolo, per cui non è stato possibile estendere la valutazione dei risultati alle lunghezze d'onda superiori a 360 nm. Inoltre la linearità del rivelatore a diamante appare molto buona, ma non va dimenticato che la misura si estende su un intervallo ristretto di valori del flusso. La linearità può essere facilmente verificata su un intervallo più esteso, introducendo, ad esempio, diaframmi di campo o filtri neutri, i quali non erano disponibili durante queste misure. Resta poi da verificare che la relazione che lega l'intensità del fascio alla corrente accumulata nell'anello rimanga lineare alle diverse lunghezze d'onda, come ci si aspetta.

Desideriamo sottolineare infine come le caratteristiche della luce di sincrotrone e la qualità dell'apparato strumentale abbiano permesso di stimare la risposta spettrale assoluta tramite due misure indipendenti, le quali hanno dato valori che si discostano meno del 6%.

In conclusione, durante il breve tempo dedicato concesso, è stato possibile valutare le potenzialità che l'apparato sperimentale sul canale di luce di sincrotrone DXR-2 disponibile presso il Laboratorio DAFNE-L dei Laboratori Nazionali di Frascati può offrire per la caratterizzazione e lo studio di rivelatori nella regione dell'UV. Inoltre è stato possibile definire i livelli d'intervento per migliorarne le prestazioni, estendendole ad un intervallo spettrale più ampio, che comprenda anche l'UV da vuoto.