

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Padova

INFN/TC-87/10

8 Settembre 1987

G.Zanella e R. Zannoni:

**STRUTTURE CONVERTITRICI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA
RIVELAZIONE DELLA RADIAZIONE X DI SINCROTRONE MEDIANTE
DISPOSITIVI A CCD**

Servizio Documentazione
dei Laboratori Nazionali di Frascati

INFN - ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
Sezione di Padova

INFN/TC-87/10
8 Settembre 1987

**STRUTTURE CONVERTITRICI PER L'OTTIMIZZAZIONE
DELLA RIVELAZIONE DELLA RADIAZIONE X DI
SINCROTRONE MEDIANTE DISPOSITIVI A CCD**

Giovanni ZANELLA e Roberto ZANNONI
Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova e INFN,
Sezione di Padova, V. F. Marzolo 8, 35131 Padova

Riassunto

Viene messo in evidenza come l'efficienza quantica di rivelazione dei raggi X, per dispositivi di rivelazione a CCD, possa essere migliorata estendendone il "range" di sensibilità mediante l'uso di strutture convertitrici fatte di elementi pesanti. Si evita in tal modo il problema della costruzione di CCD a strato di svuotamento profondo.

1.- Introduzione

L'interesse per l'impiego dei rivelatori a stato solido di tipo CCD per la rivelazione della radiazione X di sincrotrone e' sottolineato in tutta la letteratura riguardante lo sviluppo dei rivelatori per la luce di sincrotrone. Il principale vantaggio dell'uso dei CCD e' infatti la loro capacita' d'integrazione associata ad una elevata risoluzione spaziale (10-20 μm) e ad una lettura non ambigua delle coordinate X, Y. Il loro principale inconveniente sta invece nel loro limitato intervallo di sensibilita' ai raggi X (Fig. 1).

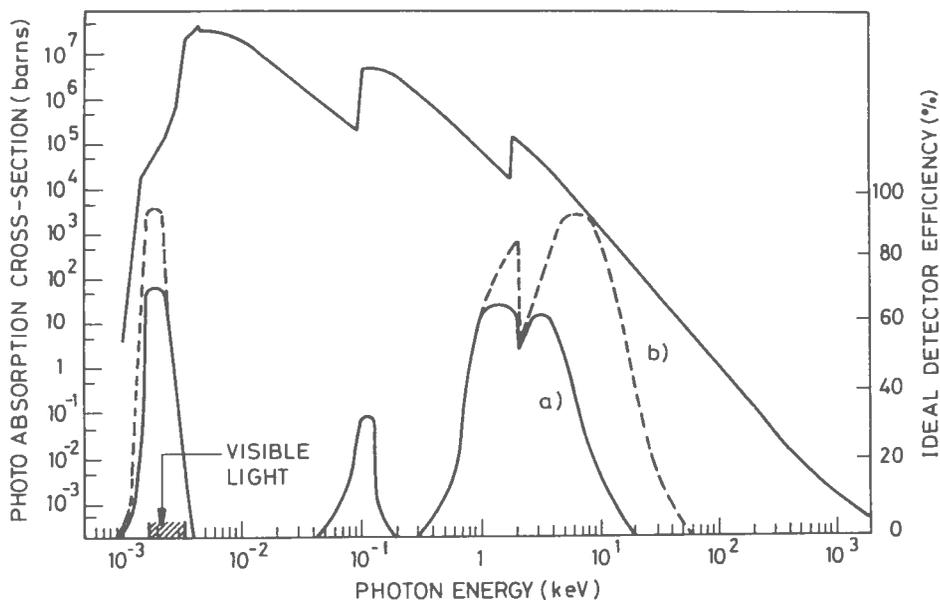


Fig. 1

Efficienza di un rivelatore al silicio ideale avente un sottile strato morto sulla superficie e uno spessore di svuotamento di: (a) 10 μm e (b) 200 μm [1].

L'estensione della sensibilita' alle energie piu' elevate (10 keV-50 keV) e' di notevole importanza per varie applicazioni tra le quali la piu' interessante e' l'angiografia a sottrazione digitale, che rientra nel piu' vasto campo della determinazione della mappa di densita' degli elementi presenti nei campioni in esame e le cui soglie di assorbimento (K o L) si situano nel predetto intervallo energetico. Infatti l'elevata monocromaticita' di fasci X di luce di sincrotrone permette di sottrarre l'immagine - X, appena sotto una soglia di assorbimento (K o L edge) dall'immagine - X appena sopra la stessa soglia di assorbimento, rivelando cosi' la mappa di densita' dell'elemento in esame. Inoltre l'elevata intensita' dei fasci X permette di eseguire questa mappa in modo dinamico.

Con i CCD il tempo di lettura varia da alcuni ms (CCD lineari) a 30-40 ms (CCD ad area), mentre il tempo d'integrazione e' variabile a piacere.

La Fig. 2 mostra a titolo d'esempio il risultato di un'integrazione (40 ms) di raggi X da 5,9 keV (^{55}Fe) ottenuto facendo operare il CCD 222 Fairchild alla frequenza di scansione televisiva e alla temperatura ambiente [3] (esperimento RIV CCD del Gruppo V).

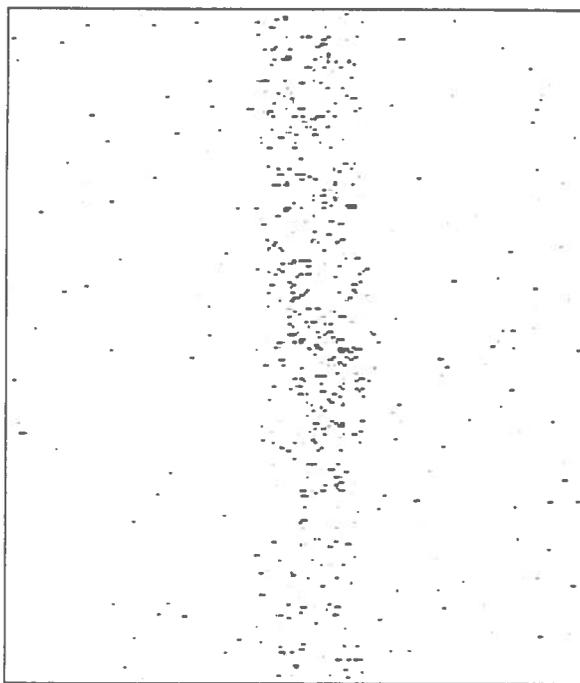


Fig. 2

Risultato dell'integrazione (40 ms) di raggi X da ^{55}Fe , emergenti da una fessura (larga 0,5mm) su carta (spessa 0.5mm), operando su una porzione di CCD 222 Fairchild (488 x 380 pixel), alla frequenza di scansione televisiva e alla temperatura ambiente [3].

La soluzione di costruire CCD con un profondo strato di svuotamento (fino a 200 μm) al fine di aumentare il range di sensibilita' ai raggi X (Fig. 1) non ha finora avuto un successo pratico a causa delle difficoltà tecnologiche che s'incontrano nel manipolare silicio ad alta resistivita' (10 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$) [1]. Non e' escluso pero' che in futuro compaiono sul mercato CCD con uno strato di svuotamento che vada oltre i tipici 10 μm .

La strada alternativa per estendere il range di sensibilita' ai raggi X, da parte dei CCD, e' quella di utilizzare una conversione X-fotoni visibili attraverso l'uso di film di materiali luminescenti (fosfori), oppure di utilizzare, attraverso l'uso di film convertitori costituiti da elementi pesanti, la conversione X-elettroni fotoelettrici e X di fluorescenza a energia piu' bassa.

E' su questa seconda alternativa che noi proponiamo di approfondire lo studio in quanto quella dei fosfori per raggi X e' una tecnologia ormai matura, sviluppata nell'ambito radiologico, che pero' presenta i seguenti inconvenienti:

- 1) Non e' possibile rivelare il singolo X senza ricorrere all'intensificatore d'immagine.
- 2) La risposta dei fosfori non e' rapida (per esempio il tempo di decadimento del $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ - uno dei fosfori a rendimento maggiore - e' pari 10^{-3}S)
- 3) Essi peggiorano la risoluzione spaziale ben oltre le dimensioni di un singolo pixel di CCD.

2.- Conversione X- elettroni fotoelettrici e X di fluorescenza

Lo schema proposto e' quello illustrato in Fig. 3, dove il CCD viene ricoperto con un film di gadolinio (il miglior candidato nelle nostre condizioni). Un fotone X, per esempio di 33 keV (corrispondente al K-edge

dello iodio) interagendo con un atomo di Gd produrrà un elettrone fotoelettrico di ~ 25 keV, con una probabilità del 70-80% [4], mentre per gli altri elettroni l'energia sarà più alta. Con riferimento ai soli fotoelettroni, supponendo che vengano emessi isotropicamente, che il loro percorso sia rettilineo, che lo spessore dello strato morto (SiO_2) sia di circa $4 \mu\text{m}$ (CCD 222 Fairchild) e che la minima energia di un elettrone per essere rivelato sia di 2 keV (rapporto segnale rumore ~ 4), risulta quanto segue.

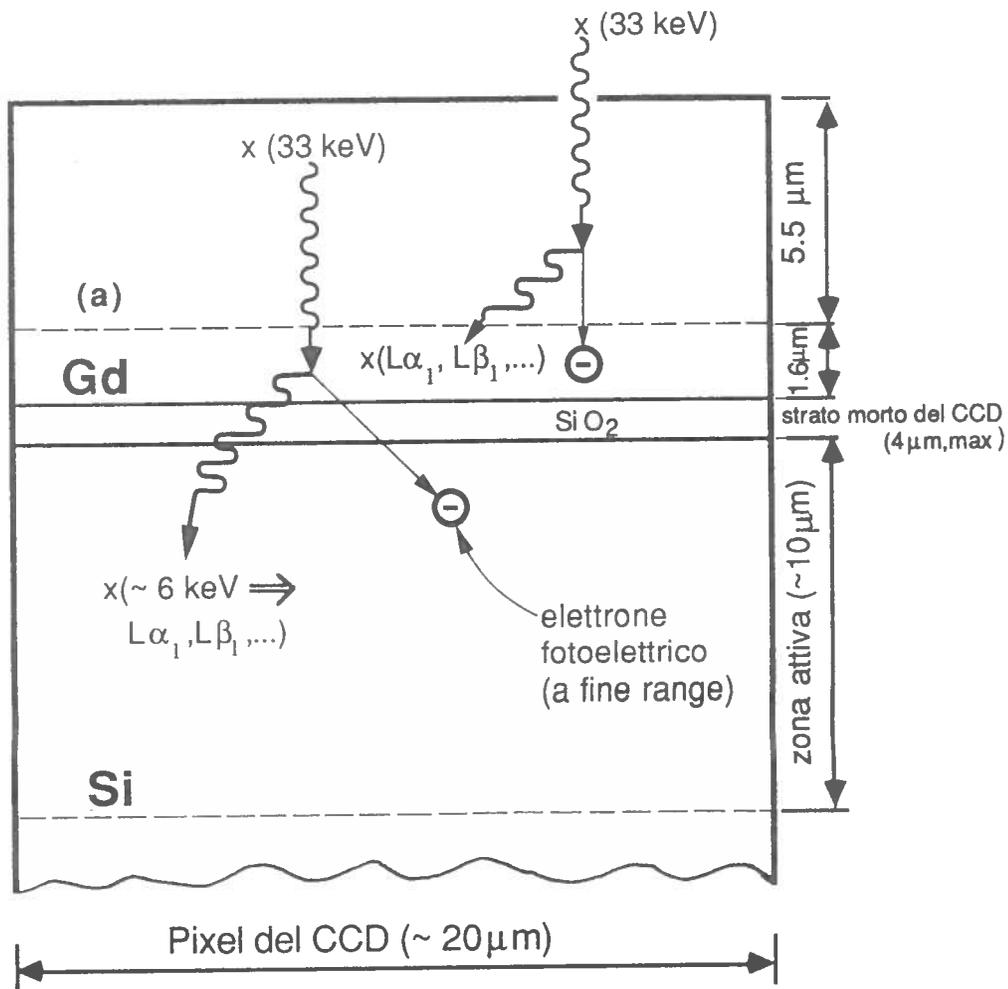


Fig. 3

Schema dell'interazione di un fotone X da 33 keV su uno strato di gadolinio posto sopra un CCD :
(a) strato limite per la rivelazione degli elettroni fotoelettrici

In ingresso allo strato morto gli elettroni devono avere almeno l'energia di 19 keV e tale condizione è soddisfatta da $h\nu - EL \sim 25$ keV (essendo EL l'energia dell'L-edge del Gd, pari a circa 8 keV).

Pertanto lo spessore utile massimo del Gd, ai fini della rivelazione degli elettroni fotoelettrici, è pari a circa $1.6 \mu\text{m}$.

Lavorando in questa condizione e con riferimento alla rivelazione dei fotoelettroni, nell'angolo solido utilizzabile, l'efficienza quantica risulterebbe del 5%, corrispondente a quella che si otterrebbe, nella rivelazione di X da 33 keV, con un CCD avente uno spessore attivo di circa $30 \mu\text{m}$. Riducendo lo strato morto al minimo essenziale (Fig. 4), lo spessore utile del Gd salirebbe a $\sim 2.5 \mu\text{m}$, con il conseguente aumento dell'efficienza al 7-8%.

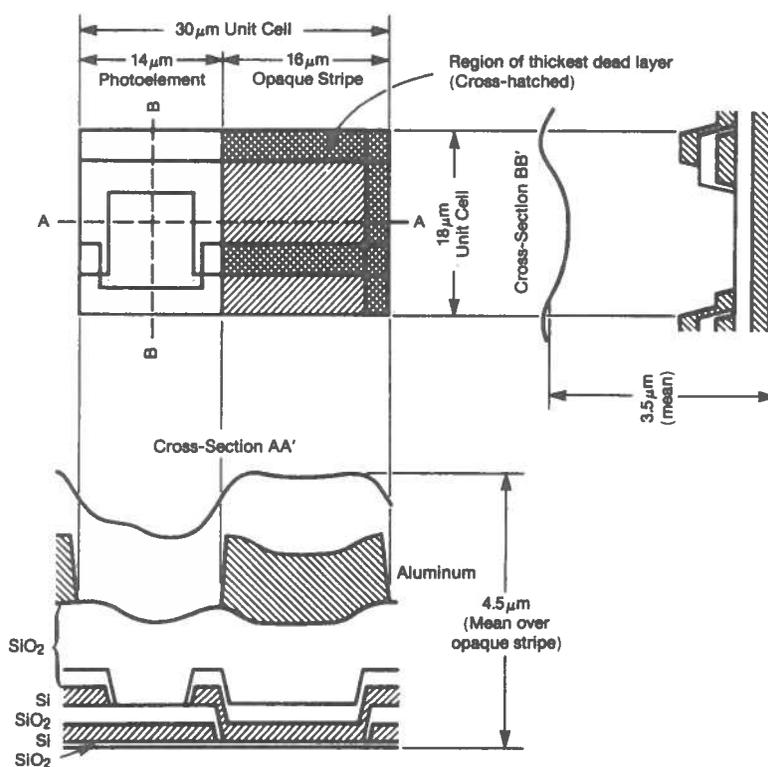


Fig. 4
Strato morto del CCD 222 Fairchild su un singolo pixel

Con un CCD privo di strato morto sarebbe piu' conveniente usare un materiale con un numero atomico piu' elevato, per aumentare la sezione d'urto degli X. Passando, per esempio, dal gadolinio al bismuto si avrebbe, sempre per X da 33 keV, un incremento dell'efficienza di un fattore 6 rispetto all'uso diretto di un CCD con lo strato di svuotamento spesso 10 μm , ovvero tale struttura convertitrice sarebbe equivalente ad un CCD con uno strato di svuotamento spesso 60 μm .

Resta ancora da valutare il contributo degli X di fluorescenza. Tale contributo si avrebbe se si aumentasse (fino a 5.5 μm per il Gd) lo spessore del materiale convertitore oltre la massima lunghezza utile ai fini della rivelazione degli elettroni fotoelettrici (Fig. 3).

Un calcolo preliminare ha mostrato che si puo' ipotizzare un raddoppio dell'efficienza.

Un'alternativa che migliorerebbe ulteriormente l'efficienza consisterebbe nell'utilizzare una struttura con due diversi elementi, dove uno strato sarebbe ottimizzato per la rivelazione degli elettroni fotoelettrici (bismuto) e l'altro per la rivelazione degli X di fluorescenza (gadolinio), arrivando a oltre 100 μm equivalenti di silicio attivo.

3.- Conversione X- fotoni visibili

Al fine di effettuare un confronto, abbiamo voluto valutare l'efficienza quantica di rivelazione di X da 33 keV usando un film di fosforo ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) posto sopra il CCD. Scegliendo uno spessore ottimale di 100 μm (compromesso tra efficienza e risoluzione spaziale) l'efficienza quantica e' valutabile attorno al 17%. Pero',

essendo l'efficienza quantica del CCD 222 Fairchild pari al 5% per $\lambda = 550$ nm (lunghezza d'onda della massima emissione del $Gd_2 O_2 S$), risulterebbe un'efficienza quantica totale dell'8,5%. Questo significa che a parità di efficienza abbiamo in alternativa X non rivelabili singolarmente (senza l'uso di un intensificatore d'immagine). Infatti ogni X che interagisce con il fosforo potrebbe dare mediamente in uscita circa 100 fotoni visibili (sul pixel più prossimo), che diventerebbero 5 a causa dell'efficienza quantica del CCD. Ora 5 fotoni visibili darebbero luogo ad un segnale di qualche elettrone nel CCD, segnale inferiore al rumore di un CCD raffreddato con azoto liquido. Però con un fascio X sufficientemente intenso si può utilizzare l'integrazione, sia nel fosforo (a causa del suo tempo di decadimento) sia nel CCD, con la conseguente rivelabilità dell'immagine X.

4.- Conclusione

Abbiamo mostrato che, usando strutture convertitrici di elementi pesanti, si può migliorare notevolmente l'efficienza di rivelazione per i raggi X, da parte dei CCD, estendendo il loro "range" di sensibilità oltre ai 10 keV. Si raggiungono in tal modo efficienze quantiche che superano quelle ottenibili dall'uso dei fosfori (senza avere i loro inconvenienti) ed equivalenti a rivelatori al silicio con volume attivo spesso oltre i 100 μm . Attualmente stiamo facendo uno studio sistematico per esplorare tutte le possibilità offerte dall'uso di questa tecnologia. Il metodo proposto si presta anche a migliorare le prestazioni degli altri rivelatori a stato solido, nella misura in cui il loro strato di svuotamento non è spesso.

Un ulteriore vantaggio offerto dall'uso di tale strutture convertitrici rispetto a volumi attivi di silicio, di spessore tale da fornire un'efficienza equivalente, consiste in una migliore risoluzione spaziale in quanto viene a mancare il fenomeno della diffusione, durante la raccolta degli elettroni costituenti il segnale di carica.

Bibliografia

- (1) C. Damerell, Nucl. Instr. and Meth. 226 (1984) 26-33.
 - (2) E. Burattini, Notiziario INFN 2 (1986) 18-19.
 - (3) A. Benetello, G. Calvelli, G. Zanella and R. Zannoni. Nucl. Instr. and Meth. (in corso di stampa).
 - (4) E. Storm and H.I. Esrael, Nuclear Data Tables, A7 (1970) 565-681.
-
-