

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 65/31  
10 Settembre 1965

R. Habel, T. Letardi e G. Marangoni: INTENSIFICATORE DI  
IMMAGINE A TRE STADI A FOCALIZZAZIONE MAGNETICA.

(Nota interna: n. 288)

Nota interna: n° 223  
10 Settembre 1965

R. Habel, T. Letardi e G. Marangoni<sup>(x)</sup>: INTENSIFICATORE DI IMMAGINE  
A TRE STADI A FOCALIZZAZIONE MAGNETICA. -

## 1. INTRODUZIONE. -

L'intensificatore di immagine è un amplificatore elettronico di bril-  
lanza che consente di vedere o fotografare sorgenti luminose di intensità  
così bassa da non essere altrimenti rivelabili se non per mezzo dei fotomol-  
tiplicatori.

Tale strumento, sviluppato dapprima quasi esclusivamente per ap-  
plicazioni militari ha successivamente trovato vasti impieghi nella ricerca.  
Ricorderemo nel seguito alcuni di questi impieghi.

In questa nota vogliamo descrivere un intensificatore di immagini  
realizzato presso i Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN, le cui carat-  
teristiche consentono di rendere fotografabili, con normali emulsioni, im-  
magini che sarebbero appena alla soglia di fotografabilità con le tecniche  
più avanzate.

Questo tubo è servito inoltre come studio preliminare per la realiz-  
zazione di un intensificatore in grado di rivelare il singolo fotoelettrone.

## 2. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO. -

Il principio con cui avviene l'amplificazione della brillantezza di una  
immagine luminosa è facilmente illustrato con l'aiuto della fig. 1. L'am-  
plificatore è costituito da un involucro di vetro in cui è praticato un vuoto

---

(x) - Tesi di laurea presso i Laboratori Nazionali di Frascati.

molto spinto (migliore di  $10^{-7}$  Torr) con due finestre piane alle estremità (1, 2) sulle quali sono formate rispettivamente una superficie fotoemittente (3) ed uno schermo fluorescente (4). Tra queste due superfici viene stabilita una differenza di potenziale  $V$ . L'immagine della sorgente luminosa  $S$  viene formata sulla superficie fotoemittente (fotocatodo).

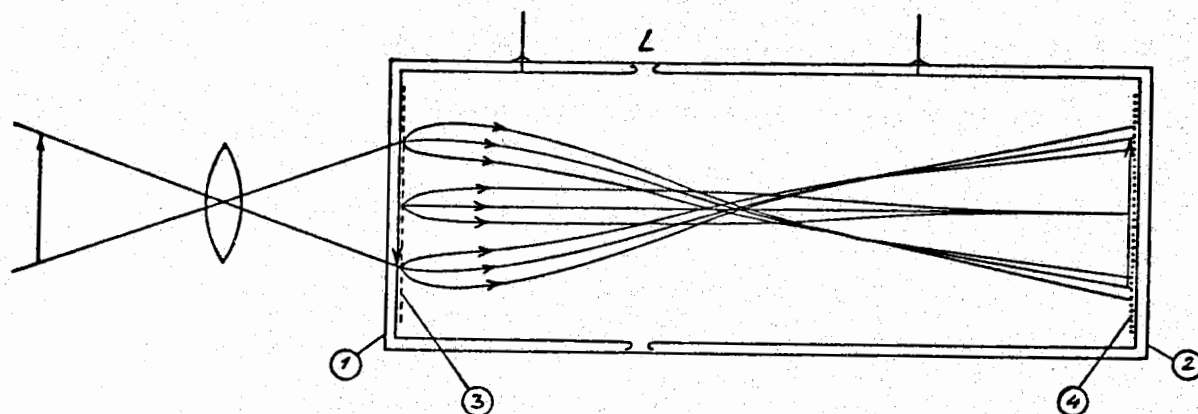


Fig. 1 - Schema di intensificatore di immagini monostadio.

1, 2 finestre ottiche di ingresso e uscita;

3 fotocatodo;

4 schermo fluorescente.

Gli elettroni emessi dal fotocatodo in corrispondenza delle zone illuminate vengono accelerati dal campo elettrico e una lente forma l'immagine elettronica della sorgente sullo schermo fluorescente. L'energia acquistata dagli elettroni, a spese della differenza di potenziale  $V$ , viene dissipata nello schermo fluorescente e parzialmente convertita in fotoni. Il fattore di amplificazione che si ottiene mediante questo processo, dipende, ovviamente, dall'efficienza di conversione del fotocatodo e dello schermo fluorescente nonché dalla energia finale degli elettroni.

Una valutazione di massima, che tenga conto dei valori in pratica assegnabili a questi tre parametri, fissa intorno a 50 il valore del fattore di amplificazione.

Il processo si può ripetere mettendo in serie più dispositivi come quello descritto (fig. 2), aumentando così il guadagno totale fino a rendere rivelabile un singolo elettrone emesso dal 1° fotocatodo. Un ulteriore aumento del guadagno non porterebbe, ovviamente, ad alcun aumento di informazione.

Una caratteristica molto importante di questi amplificatori è che si possono accoppiare fotocatodi con sensibilità in una zona dello spettro luminoso, diversa da quella di emissione del fosforo, operando così una

conversione di spettro. Ciò permette ad esempio l'osservazione visuale di sorgenti luminose nell'infrarosso o nell'ultravioletto<sup>(3)</sup>. L'intensificatore di immagine trova inoltre vantaggiose applicazioni nel campo della

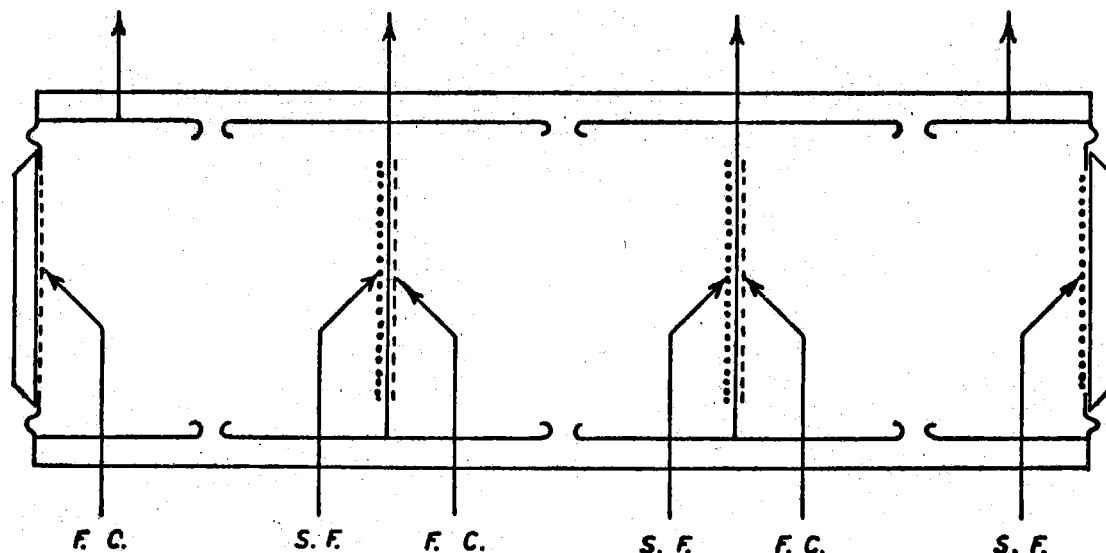


Fig. 2 - Schema di intensificatore di immagini a tre stadi in cascata.

fotografia ultrarapida. In questo caso il dispositivo può essere usato come un otturatore che rimane aperto solo per una durata di tempo pari al tempo di applicazione del potenziale accelerante. Con tubi costruiti particolarmente per questo scopo si ottengono tempi di esposizione inferiori a 10 ns<sup>(4)</sup>.

Un'altra notevole applicazione degli intensificatori di immagine si ha in Astronomia. In questo caso si preferisce rivelare l'immagine elettronica, anziché mediante lo schermo fluorescente, direttamente su una emulsione fotografica come suggerito da Lallemand<sup>(5)</sup>. L'uso degli intensificatori consente di diminuire il tempo di esposizione, e di utilizzare emulsioni fotografiche con grana più fine: ad esempio emulsioni di tipo nucleare (Ilford G5 o simili).

### 3. REALIZZAZIONE DELL'INTENSIFICATORE. -

Le caratteristiche dell'intensificatore sono riassunte nella tabella I.

L'involucro del tubo, realizzato in tre sezioni, è ottenuto saldando alternativamente anelli di metallo e di vetro in un forno ad alta frequenza.

TABELLA I

N. stadi	3
Fotocatodi semitrasparenti	CsSb-0
Risposta spettrale	S 11 (v. fig. 3)
Lunghezza d'onda al picco della risposta	4500 Å
Sensibilità del 1° Fotocatodo <sup>(x)</sup>	30 $\mu$ A/lumen
Diametro utile	30 mm
Schermo fluorescente	ZnS-Ag
Fluorescenza	bleu
Decadimento	t <sup>-n</sup>
Vita media	10 <sup>-4</sup> sec
Focalizzazione	magnetica
Tensione max di lavoro	50 kV
Guadagno <sup>(o)</sup>	5 x 10 <sup>3</sup>
Risoluzione sullo schermo fluorescente	10 coppie di linee/mm

(x) - misurata per luce bianca a 2870°K

(o) - misurata a 4500 Å per 50 kV di alimentazione

Gli anelli metallici, collegati ad un partitore di tensione, forniscono il campo elettrico uniforme accelerante. Le tre sezioni sono unite tra loro saldando ad arco in atmosfera di argon le flange terminali. Ogni sezione corrisponde ad uno stadio di amplificazione come schematicamente illustrato in fig. 2.

a) - Focalizzazione e potere risolutivo.

La focalizzazione dell'immagine sullo schermo di ciascuno stadio è ottenuta mediante l'azione combinata di un campo elettrico ed un campo magnetico statici e diretti come l'asse del tubo. Difatti gli elettroni emessi normalmente al fotocatodo proseguono il loro moto su traiettorie rettilinee mentre quelli emessi con angoli diversi da zero rispetto all'asse del tubo descrivono traiettorie a spirale la cui curvatura dipende dal valore dei campi e dalle condizioni iniziali del moto degli elettroni. È possibile scegliere i valori dei campi E ed H in modo tale che tutti gli elettroni emessi sotto qualsiasi angolo ma a parità di componente assiale della velocità iniziale da un punto del fotocatodo vadano a colpire un solo punto dello schermo fluorescente. Questa condizione che è la condizione di focheggiamento perfetto si realizza quando è verificata la relazione

$$(1) \quad d = n \frac{\pi}{B} \left( \frac{2mV}{e} \right)^{1/2}$$

essendo d la distanza tra fotocatodo e schermo fluorescente, n un numero intero, B l'induzione magnetica, m ed e la massa e la carica dell'elettrone e V la differenza di potenziale tra fotocatodo e schermo fluorescente.

Tenendo conto del fatto che gli elettroni emessi dal fotocatodo non sono monoenergetici, ma hanno una distribuzione dell'energia cinetica iniziale che varia nell'intervallo di circa 1 e V, si ha che essi, anzichè essere focalizzati su un punto, sono focalizzati su di un disco (disco di confusione) il cui diametro D è dato da

$$D = \frac{V_0 \max}{V} d$$

se  $V_0 \max$  è l'energia massima con cui vengono emessi i fotoelettroni<sup>(6)</sup>. Questo fatto porta un limite al potere risolutivo dell'apparato. Nel nostro caso si ha  $d = 10$  cm; per  $V = 15$  kV si ha

$$D = \frac{1}{1,5 \times 10^4} \times 100 = \frac{1}{1,5} \times 10^{-2} \approx 7 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

che corrisponde ad una risoluzione di 70 coppie di linee/mm.

Un'altra perdita di risoluzione si ha nell'accoppiamento tra schermo fluorescente e fotocatodo in ciascuno stadio. Se s è lo spessore del

supporto trasparente più il fosforo un punto luminoso sullo schermo fluorescente da sul fotocatodo un'immagine circolare pari circa a tale spessore<sup>(7)</sup>.

b) - Schermi fluorescenti.

Gli schermi fluorescenti sono ottenuti per sedimentazione di polvere microcristallina di ZnS-Ag in una soluzione di silicato di potassio e nitrato di bario. Lo spessore medio dei granuli è di  $8\mu$  mentre lo spessore medio dello strato è di  $\sim 25\mu$ . Come supporto si è usato un disco di mica dello spessore di  $4\mu$ . (fig. 3).

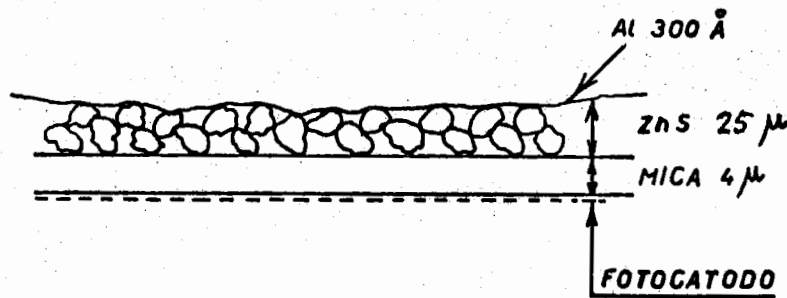


Fig. 3 - Schema di stadio di moltiplicazione intermedio.

Lo spessore complessivo (v. par. 2a) è dell'ordine di  $30\mu$  e questo significa una risoluzione di 15 coppie di linee/mm per ogni stadio di moltiplicazione. I poteri risolutivi su ogni stadio si combinano con legge quadratica<sup>(8)</sup> per cui, essendo due gli stadi di moltiplicazione intermedia si ha sullo stadio finale una risoluzione limite di

$$\frac{15}{\sqrt{2}} \simeq 10 \text{ coppie linee/mm.}$$

Come si vede il fattore che principalmente limita il potere risolutivo dell'apparato è lo spessore dello schermo fluorescente e del supporto.

Gli schermi fluorescenti sono metallizzati mediante evaporazione di un sottile strato di Al ( $\sim 300 \text{ \AA}$ ) per eliminare l'emissione di luce all'indietro che provocherebbe emissione di elettroni dal fotocatodo precedente dando luogo così ad un processo rigenerativo che distruggerebbe l'immagine.

Lo strato di Al serve inoltre a stabilizzare il potenziale dello schermo fluorescente e ad impedire che nella fase di attivazione del fotocatodo i vapori di Cs introdotti nel tubo reagiscono con il solfuro di zinco riducendolo.

## c) Realizzazione dei fotocatodi.

I fotocatodi sono preparati sotto vuoto evaporando sul supporto una quantità prefissata di antimonio ed introducendo poi il Cesio sotto forma di vapore alla temperatura di  $130^{\circ}\text{C}$  fino ad ottenere un massimo di fotomissione. Lo spessore di antimonio optimum per fotocatodi semitrasparenti è dell'ordine di  $5-6\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (9) (fig. 4).

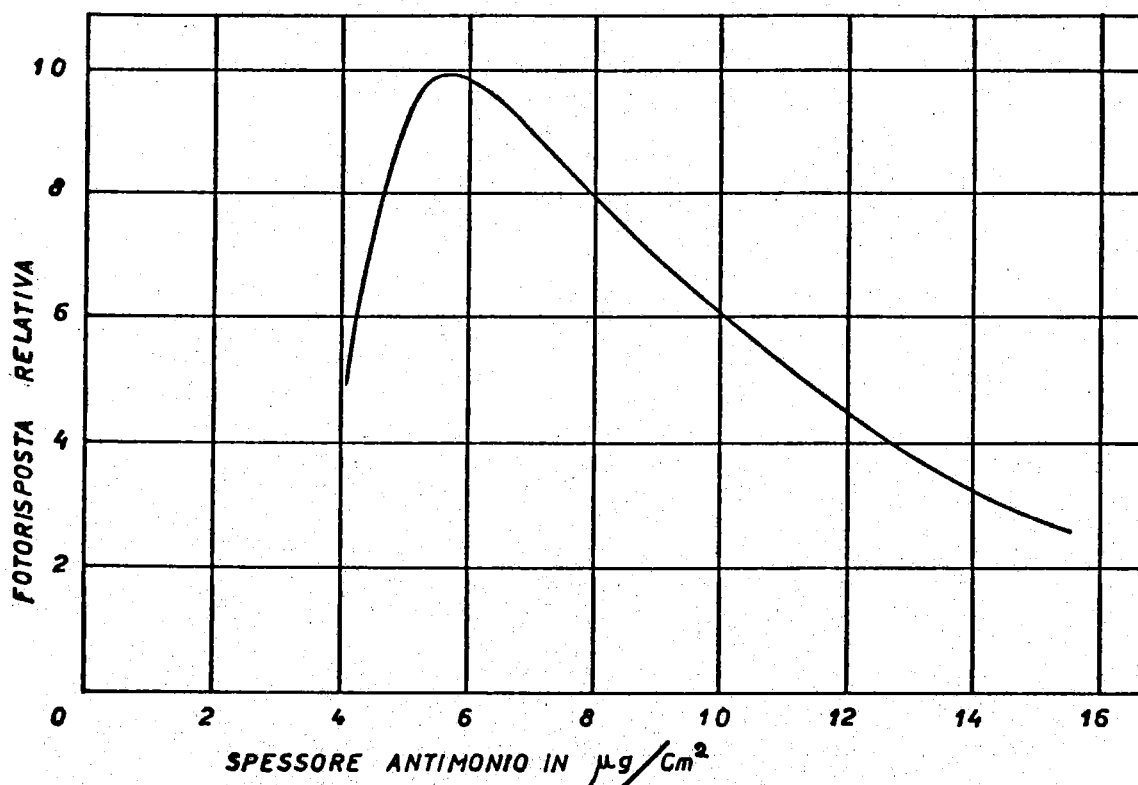


Fig. 4 - Andamento della fotorisposta relativa di un fotocatodo CsSb in funzione dello spessore dello strato di Sb (J. Appl. Phys. 26, 166 (1955)).

La quantità di antimonio evaporato sul primo fotocatodo viene determinata misurando l'assorbimento per luce bianca.

Dalle curve di fig. 5 si vede che l'optimum si ha per un assorbimento del 10-15%. Per gli stadi intermedi non essendo possibile una misura in assorbimento si è misurata la quantità di carica deposta sul supporto dovuta agli ioni di antimonio. Il metodo è stato tarato misurando nel primo fotocatodo contemporaneamente l'assorbimento e la carica raccolta.



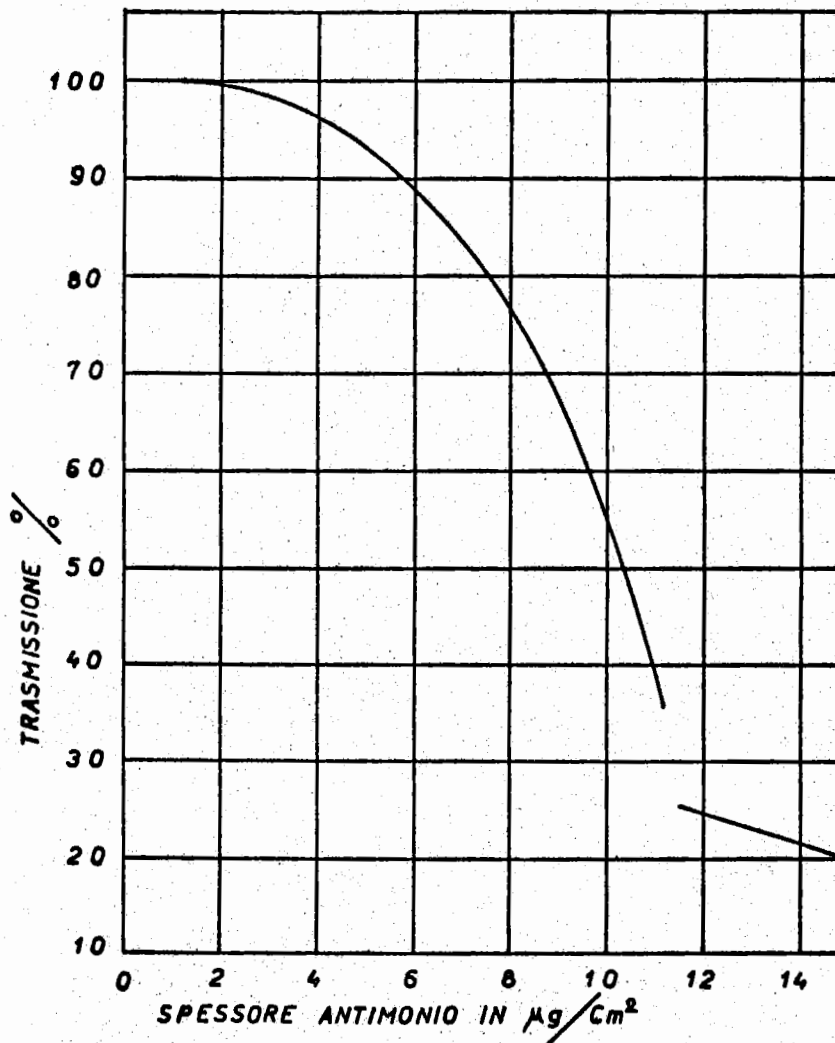


Fig. 5 - Curva di trasmissione dello strato di Sb in funzione dello spessore (J. Appl. Phys. 26, 166 (1955)).

#### 4. DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE. -

##### a) - Sensibilità.

La sensibilità del primo fotocatodo è stata misurata usando come sorgente di luce una lampada a nastro alla temperatura di colore di 2870°K.

Per la misura del flusso luminoso incidente sul fotocatodo si è usata una cella Weston Photronic con filtro Viscor. La sensibilità misurata è di 30 μA/lumen.

Del primo fotocatodo si è misurata anche l'uniformità esplorando un diametro con una macchia luminoso del diametro di 1mm. Nel grafico

di fig. 6 è riportato il risultato della misura.

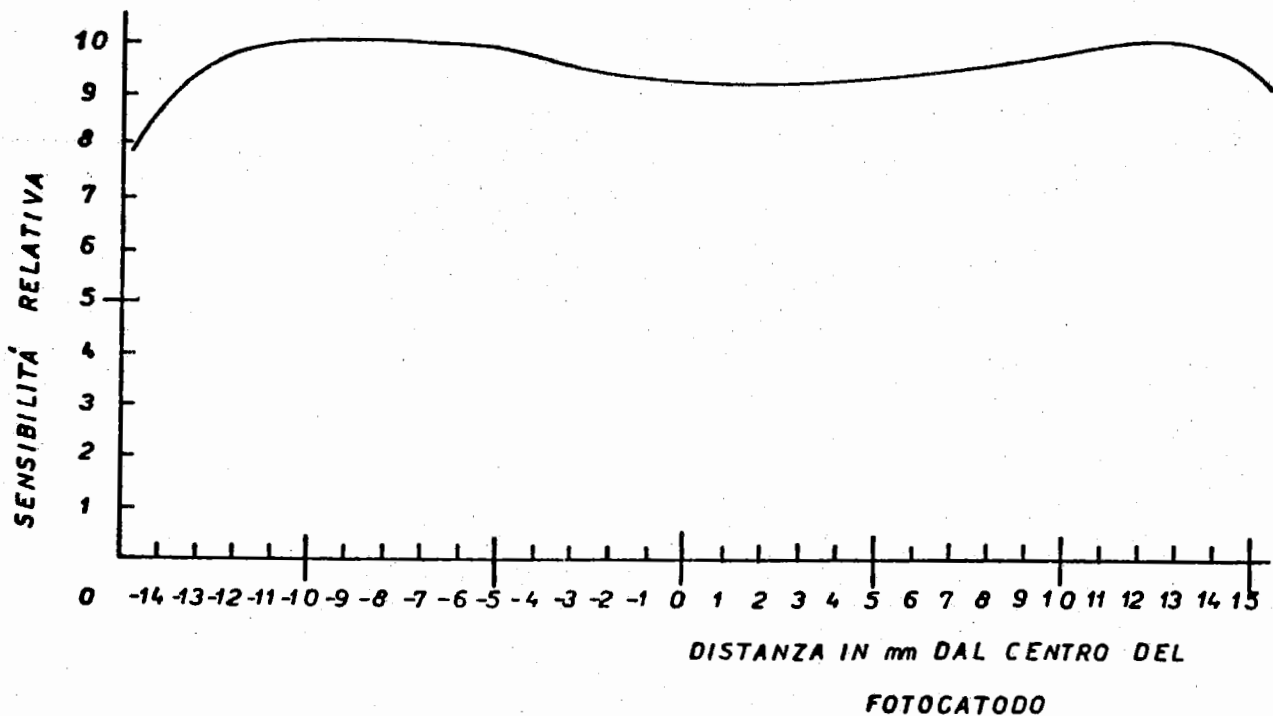


Fig. 6 - Andamento della sensibilità relativa del primo fotocatodo lungo un diametro.

b) - Amplificazione e rumore di fondo.

Il fattore di amplificazione è stato determinato misurando il flusso luminoso in ingresso ed in uscita con un fotomoltiplicatore. La misura è stata effettuata illuminando il fotocatodo con luce monocromatica a 4500 Å.

Nel grafico di fig. 7 sono riportati i valori del fattore di amplificazione in funzione della tensione di alimentazione.

Nel grafico di fig. 8 è riportato l'andamento del rumore di fondo in funzione della tensione di alimentazione. La misura è stata effettuata accoppiando direttamente per mezzo di una guida di luce lo schermo fluorescente dell'intensificatore ad un fotomoltiplicatore usato come fotocellula. In ordinata sul grafico è riportato il valore della fotocorrente misurata nella cella. Nello stesso grafico è riportato il rumore equivalente in ingresso in funzione della tensione di alimentazione. Il rumore equivalente è qui definito come la corrente di elettroni sul primo fotocatodo necessaria a produrre in uscita un segnale della stessa ampiezza del fondo.

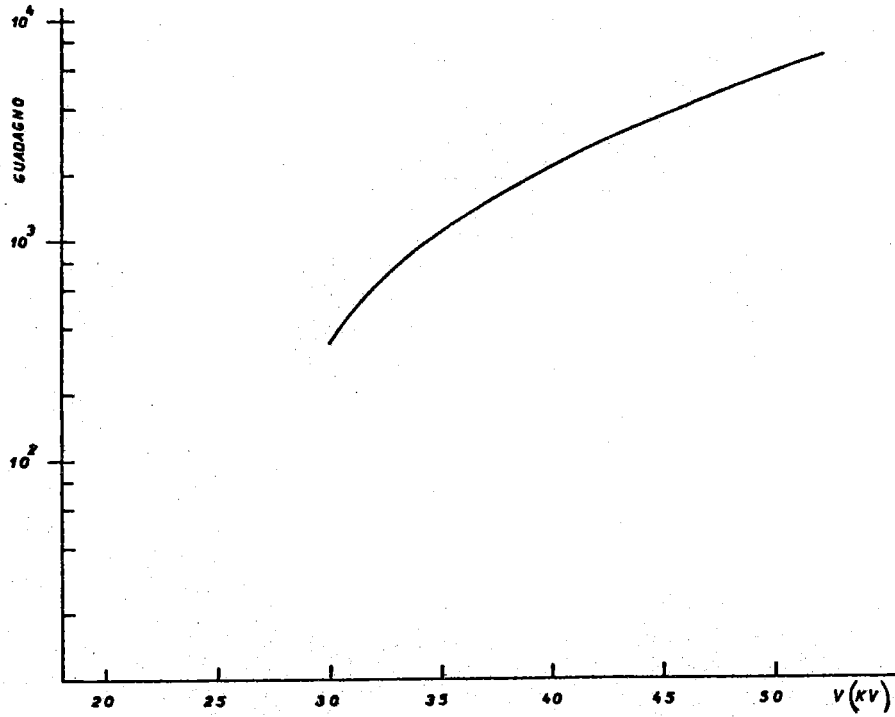


Fig. 7 - Guadagno in funzione della tensione di alimentazione.

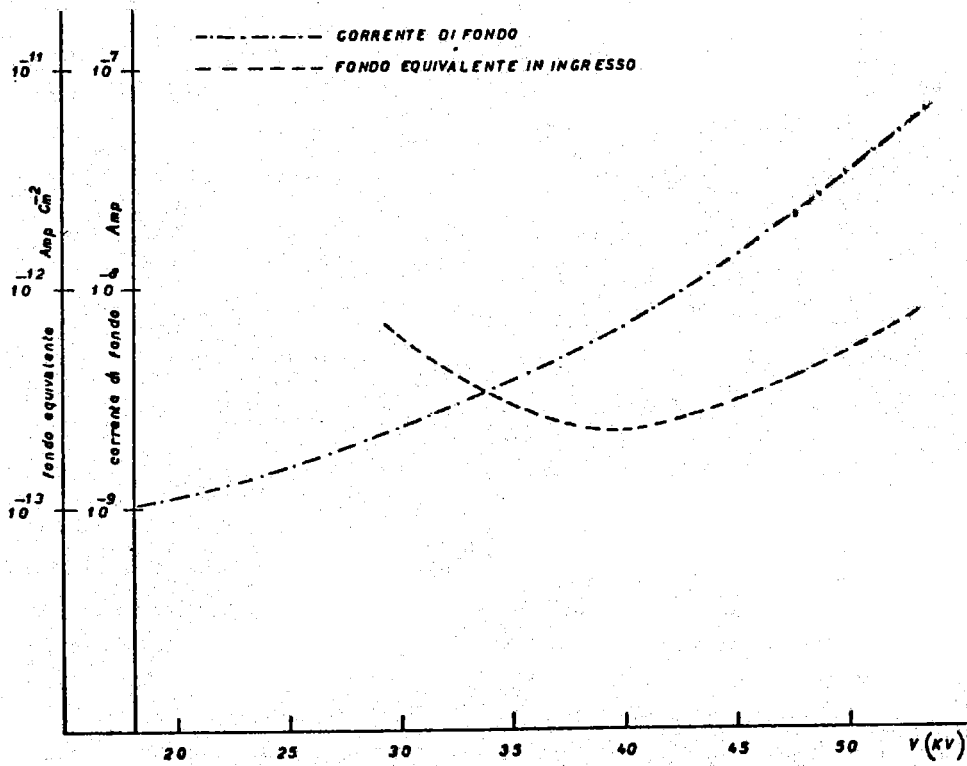


Fig. 8 - Corrente di fondo e fondo equivalente in funzione della tensione di alimentazione.

## c) - Risoluzione.

Il potere risolutivo è stato determinato mediante reticoli fotografici costituiti da righe parallele bianche e nere di egual spessore. Il potere risolutivo osservato è dell'ordine di 10 coppie di linee/mm in accordo con quanto calcolato.

## 5. CONCLUSIONI. -

I risultati ottenuti con questo intensificatore a tra stadi ci permettono di trarre le seguenti conclusioni:

- a) - La realizzazione dell'involucro in parti separate componibili ha dato buoni risultati sia dal punto di vista elettrico che meccanico. Infatti l'allineamento degli elettrodi che forniscono il campo elettrico accelerante è risultato tale da assicurarci una buona uniformità del campo. Tale sistema inoltre consente agevolmente l'aumento del numero di stadi di amplificazione fino ad ottenere il guadagno necessario alla rivelazione del singolo fotoelettrone emesso dal 1° catodo.
- b) - La nostra tecnica di preparazione dei fotocatodi ci consente di ottenere, sia per il primo che per quelli intermedi, sensibilità nell'intervallo  $30 + 60 \mu\text{A/lumen}$ .
- c) - C'è da rilevare infine che nel caso di un tubo a più di tre stadi diventa particolarmente sentito il problema di migliorare gli schermi fluorescenti che, per quanto detto, costituiscono la limitazione più seria al potere risolutivo ottenibile.

## BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - E. K. Zavojskij et al. , Luminescence camera, Doklady Akad. Nauk SSSR 100, 24 (1955); Una rassegna completa dei lavori più recenti si può trovare su Advances in Electronics and Electron Physics, vol. 16 (1962).
- (2) - L. Mandel, Realizable light gain in photoelectronic image intensifiers, J. Sci. Instr. 32, 405 (1955).
- (3) - G. A. Morton and L. E. Flory, An infrared image tube and its military applications, RCA Rev.
- (4) - A. E. Huston and F. Walters, Electron tubes for high-speed photography, Adv. in Elec. and Electron Phys. 16, 249 (1962).
- (5) - A. Lallemand, Compt. Rend. 203, 243 (1936).
- (6) - v. ad es. V. K. Zworykin and E. G. Ramberg, Photoelectricity (J. Wiley and Sons, New York), pag. 164.

- (6) - v. ad es. V. K. Zworykin and E. G. Ramberg, Photoelectricity (J. Wiley and Sons, New York), pag. 164.
- (7) - B. Zackarov, Adv. in Elec. and Electron Phys. 18, 67 (1962).
- (8) - A. Roberts, Amplificazion of transient images in high-gain photocathode-phosphor image intensifier systems, Adv. in Elec. and Electron Phys. 12, 135 (1960).
- (9) - M. Rome, Relation of antimony transmission and the photoelectric yield of Cs-Sb, J. Appl. Phys. 26, 166 (1955).

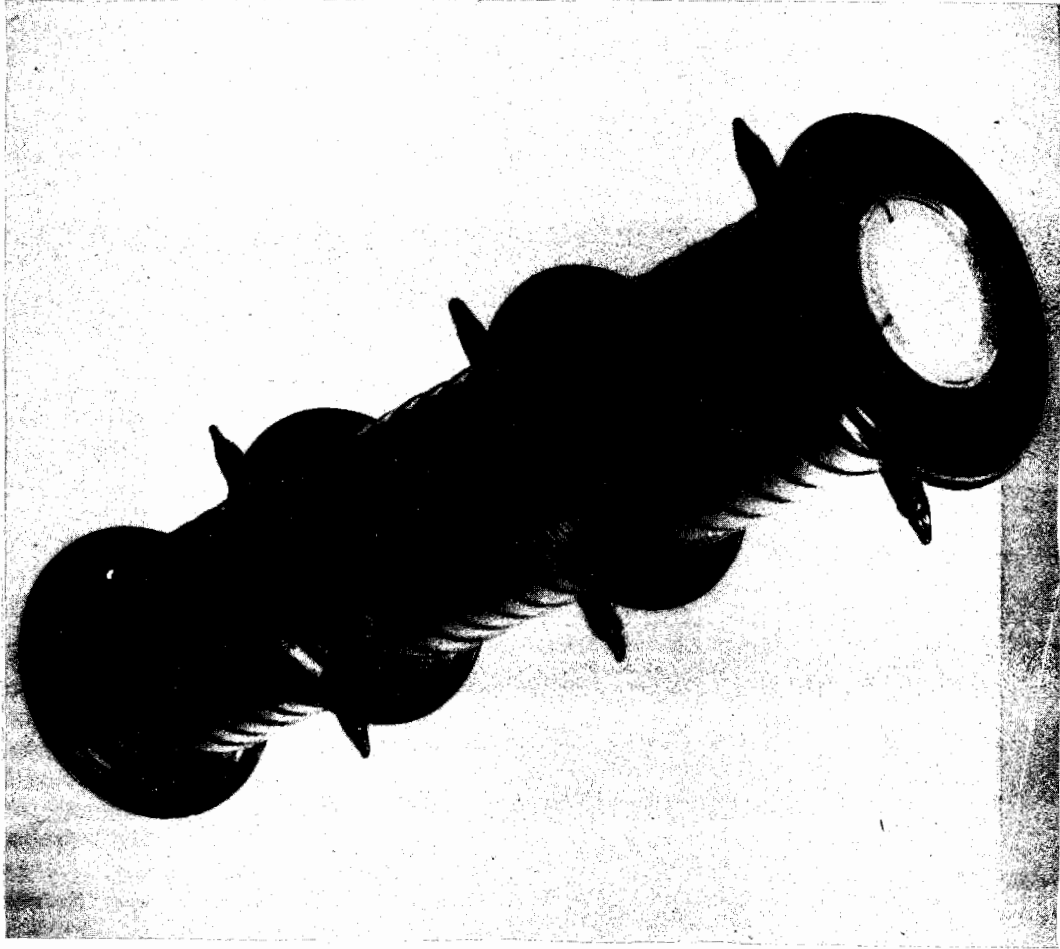


FOTO 1 - Intensificatore a tre stadi. E' visibile lo schermo fluorescente d'uscita.

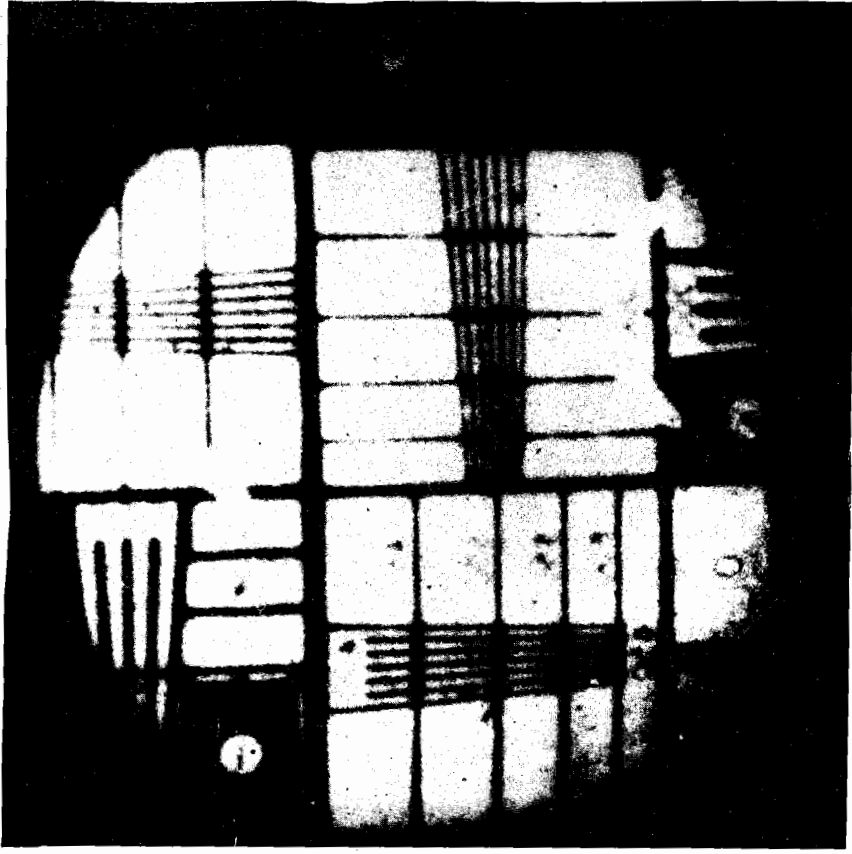


FOTO 2 - Reticolo per prove di risoluzione fotografato mediante l'intensificatore.