

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-60/49 (3. 11. 60)

O. Gildemeister, R. Giese: PREPARAZIONE DI SCHERMI FLUORESCENTI PER INTENSIFICATORI DI IMMAGINE. (Traduzione dal tedesco).

Nota interna: n° 56
3 Novembre 1960

O. Gildemeister e R. Giese: PREPARAZIONE DI SCHERMI FLUORESCENTI PER INTENSIFICATORI DI IMMAGINE (Traduzione dal Tedesco(+)).

Introduzione

Negli ultimi tempi in diversi istituti si sono iniziati degli studi per la costruzione di rivelatori di particelle, consistenti nell'individuare le tracce delle particelle entro preparati fosforescenti attraverso una tecnica fotografica. C'è da attendersi che in alcuni casi, particolarmente nelle ricerche su processi nucleari molto rari, questo tipo di rivelatore sia superiore ad altri. La quantità di luce emessa negli scintillatori è relativamente piccola e occorre una intensificazione di luce di circa 10^5 .

Nell'Istituto di Fisica dell'Università di Bonn già da circa 3 anni si sta studiando un intensificatore di luce con un guadagno di 10^5 e 10^6 e con un diametro di 3 cm. Ulteriori possibilità delle intensificazioni di luce sono state discusse durante la 'International Conference on High-Energy Accelerator and Instruments CERN 1959'. (vedi bibliografia n° 1).

1) - 1 Determinazione del problema.

In questo lavoro verrà descritto il procedimento per la costruzione degli schermi fluorescenti di alcuni intensificatori di immagine pluristadio e insieme anche le prove fatte sui materiali commerciali fosforescenti adottati per questo scopo.

(+) - Physikalisches Institut der Universität Bonn - Mai 1960.

I problemi che sorgono nel realizzare uno schermo fluorescente riguardano la costruzione meccanica ed il funzionamento dell'intensificatore che si vuol costruire.

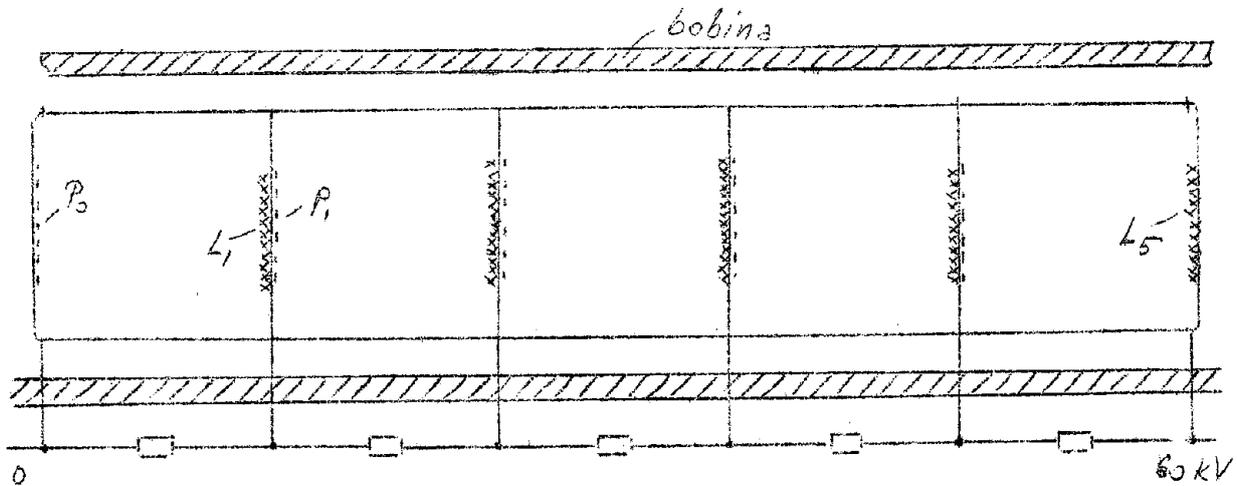


FIG. 1

Un tubo cilindrico è chiuso dai due lati con due superfici di vetro piane. Sulla parte interna di una delle superfici si trova un fotocatodo p_0 (v. fig. 1). Su questo viene focalizzato l'oggetto da considerare. Gli elettroni emessi da p_0 sono accelerati da un campo elettrico da 12 a 20 KV e mediante un campo magnetico omogeneo longitudinale, sono focalizzati su di uno schermo fosforescente L_1 . L_1 si trova depositato su una sottile foglia di vetro sulla cui altra faccia è stato depositato un secondo fotocatodo p_1 . In L_1 gli elettroni producono molti quanti di luce che fanno uscire da p_1 ancora un maggior numero di elettroni. Un simile procedimento viene ripetuto diverse volte: gli elettroni emessi da p_1 vengono accelerati e così via. L'intensificatore di immagini ha 5 stadi. L'ultimo schermo fluorescente L_5 si trova all'altra estremità del tubo depositato su una superficie piana di vetro. L'immagine che compare su L_5 è tanto intensificata che può essere fotografata.

Dal fotocatodo vengono emessi non soltanto gli elettroni per effetto fotoelettrico, ma anche alcuni elettroni di fondo (circa 10^{-15} A per cmq.). Se si desidera fotografare la traccia di una particella elementare in uno scintillatore occorre che dal primo fotocatodo vengano fuori da 10 a 20 elettroni per cm di percorso. Il numero di elettroni di fondo (emessi per corrente di buio) deve essere il più basso possibile. E' pertanto necessario che il primo stadio e possibilmente anche il secondo stadio vengano fatti funzionare soltanto per limitati intervalli di tempo. Si può mediante pulsaggio della alta tensione impiegata ottenere questo risultato. La durata dell'impulso è per il primo stadio determinata dalla durata del processo che si deve osservare, per esempio il tempo di scintillazione di uno scintillatore (10^{-5} secondi nello Ioduro di Cesio attivato con Tallio) limita inferiormente questo tempo; nel secondo stadio si deve invece considera

sione di luce degli elettroni dalla banda di conduzione alla banda di valenza dipendono dalla presenza di questi difetti.

Circa e) il potere risolutivo dell'intensificatore di immagine viene condizionato dalla dimensione dei granuli del fosforo impiegato, dallo spessore dello strato fosforescente, o dallo spessore del vetro di supporto.

Composizione di uno schermo luminescente. Il fotocatodo di Cs-Sb viene dapprima prodotto per evaporazione in vuoto spinto.-

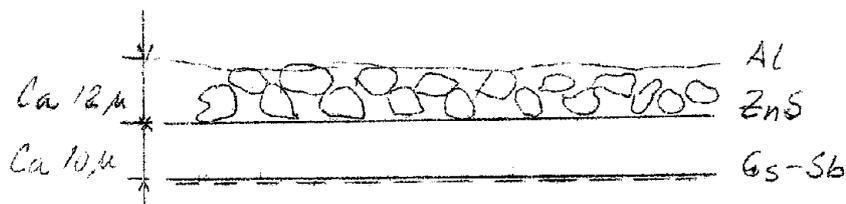


FIG. 2

In generale viene assunto come potere risolutivo di uno schermo fluorescente granulare, circa la dimensione dei granuli moltiplicati per un fattore 5. Per questo si assume che lo schermo fluorescente venga fatto lavorare otticamente. Per una ricerca preliminare è stato costruito un formatore di immagine ad un solo stadio con uno schermo di solfuro di zinco con granuli da 10 a 12 micron di diametro ed uno spessore dello schermo di circa 2 granuli (5 mg. per cmq.) e si è trovato un potere risolutivo superiore a 20 linee per mm. Lo strato deve essere il più possibile sottile poichè la diffusione della luce peggiora il potere risolutivo. Il limite inferiore dello spessore dello schermo è ovviamente la dimensione di un granulo. Per una copertura completa occorrono circa 1,3 diametri del granulo.

Ciò corrisponde, con una grandezza dei granuli di 10 a 12 μ , a uno spessore dello strato di circa 3 mg al cmq. Il potere penetrante degli elettroni è, a 10 KV di circa 1 μ .

Nel convertitore di immagine a più stadi il potere risolutivo è ridotto ulteriormente a causa dello spessore della lamina di vetro (finale) tra lo schermo fluorescente e il fotocatodo.

Circa f): è sempre opportuno ricoprire la parte posteriore dello schermo fluorescente, cioè quella affacciata verso la sorgente di elettroni, con uno strato di alluminio. Questo ha diverse importanti funzioni:

- 1) riflettere la luce emessa verso l'indietro, aumentando per tanto la intensificazione di circa un fattore 2.

- 2) allo stesso tempo esso impedisce che la luce di uno schermo fluorescente cada sul precedente fotocatodo (per es. da p_2 a p_1) (accoppiamento ottico all'indietro) in modo tale che il sistema diventi probabilmente instabile o perlomeno sorga un forte fondo.
- 3) Come è stato precedentemente accennato lo schermo fluorescente si trova depositato su una sottile lastra di vetro. Il fosforo stesso come il vetro è un buon isolante. Alle tensioni alte (circa 12 KV) il coefficiente di emissione secondaria del fosforo diventa più piccolo di 1 e il potenziale dello schermo fluorescente decresce fin sotto il potenziale anodico. Un sottile strato di alluminio conduttore sullo schermo impedisce questo effetto.
- 4) Mentre lo schermo fluorescente può resistere ad azione dell'aria e può essere formato durante la costruzione del tubo i fotocatodi debbono essere formati quando il tubo è già evacuato. I metalli necessari per la formazione del fotocatodo (antimonio e il cesio) vengono evaporati sotto vuoto.

Durante questo processo lo schermo fluorescente si trova già presente entro il tubo. Perciò è da evitarsi che il cesio vada a depositarsi sopra lo schermo fluorescente in quanto l'esperienza mostra che il solfuro di zinco (che è praticamente l'unico schermo usabile) viene influenzato negativamente dalla presenza di cesio. Esso diventa, probabilmente a causa della riduzione dello zinco, tra il grigio ed il nero. Pertanto a seguito del notevole assorbimento di luce viene ridotto il guadagno dello stadio. D'altra parte alcuni prodotti di evaporazione probabilmente lo zinco che si stacca dallo schermo, avvelenano il fotocatodo. Questi fatti possono essere evitati se lo schermo di solfuro di zinco viene opportunamente protetto da uno strato di alluminio che lo separi dallo spazio circostante, in altri termini lo schermo di alluminio deve essere possibilmente spesso e deve presentare una superficie uniforme e senza buchi anche alla temperatura di 480°C . Naturalmente si capisce che lo schermo di alluminio deve essere non troppo spesso poichè altrimenti le perdite di energia degli elettroni divengono troppo grandi. Spessori opportuni sono compresi tra 100 e 200 μ . Con 46 μ di spessore, la trasparenza dell'alluminio è ottima per la luce blu. Il coefficiente di riflessione di uno schermo di alluminio spesso 0,3 μ su uno schermo fluorescente è stato determinato da Brill e Clasens. Essi hanno trovato un valore di circa 0,8.

1) 3 - Ricerche sulle sostanze fluorescenti.

Da una considerazione riassuntiva di Brill e Clasens (v. bibliografia n° 2) si trae la conclusione che per i nostri scopi sono utili soltanto gli schermi di solfuro di zinco attivato con argento, di silicato di zinco attivato con titanio (ZnSiO_4/Ti), e di silicato doppio di calcio e magnesio attivato con titanio ($(\text{CaMg})\text{SiO}_4/\text{Ti}$). Negli ultimi due ca

si gli schermi sono meno efficienti del solfuro di zinco (ZnS), hanno però il vantaggio che essi decadono esponenzialmente con la costante di tempo piuttosto piccola (5 in luogo di 25 μ s). Questi ultimi possono essere usati per il primo schermo fluorescente.

Pertanto sono state studiate le seguenti sostanze fosforescenti:

Denominaz.	Sost. Fondam.	att.	strutt.	Dim. gran.	Casa Produttrice
FKB ¹⁾	ZnS	Ag		8-11 μ	Riedel de Haen
K1 blau/1	ZnS	Ag	kub.	8-12 μ	Leuchtsteffwerk Heidelberg
K1 blau/2	ZnS	Ag	hex.	10-20 μ	Leuchtsteffwerk Heidelberg
S1 blau/1	ZnS	Ag	kub.	6-8 μ	Leuchtsteffwerk Heidelberg
S3 wei - blau/2	ZnS/ZnSe	Ag		5-6 μ	Leuchtsteffwerk Heidelberg
Zn ₂ SiO ₄ - 0,01 TiO ₂	Zn ₂ SiO ₄	Ti		ca. 2 μ	Philips
CaMgSiO ₄ - 0,03 TiO ₂	CaMgSiO ₄	Ti		ca. 2 μ	Philips

Tabella 1

Capitolo n° 2 - FORMAZIONE DELLO SCHERMO FOSFORESCENTE

2) - 1 - Generalità

Come si vede dalla fig. 1 per un intensificatore a 5 stadi debbono essere formati 4 schermi su sottili foglie di materiale di supporto e 1 schermo su una foglia più spessa di vetro piano. Le foglie di supporto sono di vetro dello spessore di ca. 10 μ e sono fissate su un anello di metallo.

Su entrambe le facce viene evaporata una corona circolare di alluminio dello spessore di circa 400 m μ . Il procedimento di evaporazione sarà descritto in appendice.

Foglia di vetro depositata per fusione
sull'anello di metallo.-

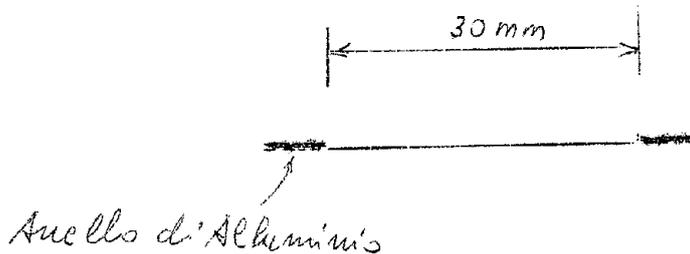


FIG. 3

I passi successivi sono: sedimentazione dello schermo fluorescente, sovrapposizione della componente di cellulosa, ricopertura dello strato di cellulosa con alluminio mediante evaporazione, asportazione della cellulosa e di nuovo evaporazione di alluminio. Il legante a base di cellulosa serve come sostegno per lo schermo di alluminio. Se si evaporasse l'alluminio direttamente sul materiale fosforescente, non si otterrebbe uno strato sufficientemente solido. Nella formazione dello schermo fluorescente si deve lavorare sempre con la più grande pulizia; piccole tracce di sostanze per esempio 10^{-6} di nikel di cobalto e di ferro possono impedire o ridurre di molto la luminescenza.

Per ottenere uno schermo di solfuro di zinco (ZnS) che emetta nel blu in generale si usa l'argento come attivatore. Si potrebbe usare come attivatore anche il rame, ma in questo caso si ha emissione verde. Poichè la concentrazione di attivatore è dell'ordine di 10^{-4} bisogna essere molto attenti ad evitare ogni contaminazione di tracce di rame. In particolare occorre usare acqua distillata che non sia stata distillata in recipienti di rame.

Come materiali chimici vengono usati i materiali 'Per pura' della Ditta Merck unt Calivasserglass' della Ditta Henkel and C., Dusseldorf.

2) 2 - Sedimentazione del materiale fluorescente.

Il materiale fluorescente viene sedimentato da una soluzione di silicato e acido acetico. La soluzione viene prodotta nella seguente maniera: 200 cc di acqua distillata vengono mescolati opportunamente con 10 cc di silicato di sodio (o potassio).

A questo si aggiungono ancora 8 cc di acido acetico al 12%. Dalla nuova miscela in 150 cc vengono aggiunti 240 mg di solfuro di zinco in sospensione e vengono lasciati per circa 1 minuto in un cilindro tenuto fermo per una sedimentazione preliminare. Questa serve per separare le particelle più

grosse del materiale fosforescente. la foglia di vetro di supporto pulita con misto cromatico e accuratamente lavata con acqua distillata si trova entro un becker di circa 60 cmq di sezione che precedentemente è stato riempito con 50 cc di soluzione. La foglia di vetro giace al di sotto del livello del liquido sorretta da un anello di alluminio. Una superficie piana di supporto la tiene ferma. Dopo la sedimentazione preliminare, la sospensione di particelle fosforescenti viene versata molto attentamente. La sedimentazione finisce dopo circa 15 minuti e si forma uno strato omogeneo fosforescente di circa 3 mg per cmq. Il 25% del fosforo durante il processo viene eliminato dalla sedimentazione preliminare. La soluzione deve riposare da 2 a 3 ore sopra lo schermo fluorescente. Durante questo tempo per influsso dell'acido acetico il silicato di sodio prosegue la polimerizzazione il che corrisponde al formarsi di uno strato fosforescente.

Poi mediante un capillare connesso con una pompa ad acqua la superficie della soluzione di materiale fosforescente ed altre impurità vengono asportate fino a che la soluzione rimane circa 1 cm al di sopra dello strato di fosforo.

Poichè a questo punto lo schermo non è affatto solido, la soluzione almeno da un centimetro di altezza in poi deve essere tolta molto lentamente. Pertanto il becker deve essere leggermente inclinato con un foglio di carta da filtro. In questo modo si può ottenere un opportuno tempo di asciugamento della soluzione. Se il recipiente viene evacuato troppo lentamente o troppo rapidamente, può accadere che lo schermo venga danneggiato. Subito dopo l'uso i recipienti di vetro impiegati debbono essere lavati con acqua distillata.

Il procedimento sopra descritto deve essere cambiato quando in luogo di ZnS si usa Zn_2SiO_4 ; infatti dopo breve tempo questa soluzione gelatinizza in piccole zone nella superficie del vetro e la polvere fosforescente viene asportata.

Con sospensione di Zn_2SiO_4 si proceda come segue:

Vengono messi nel becker 50 cc di H_2O distillata insieme alla foglia di vetro sulla quale si deve fare la deposizione. 150 cc di acqua e 6 cc di CH_3COOH al 12% vengono ben mescolati e viene fatta una sospensione con 120 milligrammi di polvere di Zn_2SiO_4 . Dopo una breve presedimentazione in un cilindro si aggiungono ancora 7,5 cc di silicato di sodio, che deve essere energicamente versato nel becker. La soluzione può essere esportata dopo 40 o 60 minuti.

2) 3 - La foglia di cellulosa.

Dopo l'essiccamento il disco della foglia di vetro viene fissato sull'anello di metallo con un robusto collante. Dopo di ciò la foglia di vetro viene posta sopra un piano fo

rato di alluminio, il quale poi verrà messo tre o quattro millimetri sotto il pelo dell'acqua; la polvere e le piccole particelle di materiale fosforescente vengono tolte via mediante un tubicino capillare. Lo strato di materiale fosforescente è nel frattempo diventato così resistente che non può più perdere granuli di materiale.

Dal modo di produrre lo strato di cellulosa e dal suo trattamento dipende lo spessore che deve avere lo strato di alluminio da evaporare sopra. Nella maniera descritta appresso si ottengono discreti risultati.

Con un bastone di vetro una goccia di una soluzione di cellulosa è posta sopra la superficie dell'acqua. Si è usata una soluzione di nitrocellulosa in acetato di butile. Inoltre la soluzione contiene alcool e tributilfosfato. La goccia si allarga in breve tempo sulla superficie dell'acqua ed il solvente evapora. Dal colore delle frangie di interferenza si può capire quando è il momento che la foglia può essere utilizzata. Se si ottiene uno spessore di cellulosa non opportuno lo si può di nuovo togliere via mediante il bastone di vetro. Uno spessore buono si ottiene circa in 15 minuti sulla superficie dell'acqua. Quindi l'acqua viene tolta via mentre la foglia di vetro dello schermo si trova posta sulla piastra di alluminio. La foglia di cellulosa si appoggia, con il diminuire del livello dell'acqua, sopra lo strato fosforescente. Si è dimostrato opportuno subito in questo stato porre lo schermo fosforescente in un essiccatore e lasciarcela per alcuni giorni.

Dopo l'essiccamento si vede un buono strato di cellulosa che riflette la luce opacamente. Se esso è completamente opaco oppure non si riesce a vederlo vuol dire che si è attaccato eccessivamente sulle particelle di materiale fosforescente e lo strato di alluminio da evaporarvi sopra successivamente non risulta più buono. (x)

Se lo strato di cellulosa è in tensione si ottiene dopo una opportuna evaporazione uno strato di alluminio senza buchi che però non aderisce abbastanza allo strato fosforescente e può essere staccato mediante trazione della cellulosa.

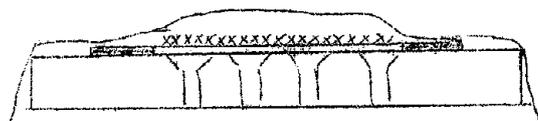
Prima dell'evaporazione con l'alluminio lo schermo fluorescente viene per una volta e per breve tempo riscaldato a 100°C e raffreddato lentamente. Per quanto riguarda la formazione dello strato di cellulosa per l'ultimo schermo fosforescente sulla foglia di vetro, si deve seguire una re

(x) - Si ottiene uno strato di alluminio buono se la distanza media fra i buchi dell'ordine di 1μ è di circa 20 μ . Per fori più grandi la distanza deve essere corrispondentemente maggiore.

gola di sicurezza che sarà descritta nell'appendice n° 12.

2) 4 - Evaporazione dell'alluminio.

Lo strato di alluminio deve essere evaporato in alto vuoto. per evitare di rovinare lo strato di cellulosa mediante grandi differenze di pressione si pompa lentamente, quando si è ancora nel campo del vuoto preliminare (variazione di pressione di circa 20 torricelli per minuto). Lo stesso vale anche per l'ingresso dell'aria. Ad una pressione di circa 10^{-5} torr. si può cominciare l'evaporazione.



Schermo luminescente su piatto di alluminio traforato dopo che si è depositata la pellicola di cellulosa.

FIG. 4



Filo di Wolframio con Alluminio.-

FIG. 5

Un filo di wolframio di $1 \div 2$ mm di diametro e piegato secondo quanto si vede nella figura 5 serve come supporto per l'alluminio da evaporare e viene scaldato mediante corrente alternata (circa 60 Amp). La distanza dallo schermo fluorescente non deve essere troppo piccola. 10 cm è una distanza ragionevole. Se si usa per esempio 11 cm e si evaporano per esempio 50 mm^3 di alluminio quantitativamente si ottiene uno spessore dello strato di circa $200 \div 250 \text{ m}\mu$. Accanto allo schermo fluorescente si dispone una piastrina di vetro di 8 cm di lunghezza e 0,5 cm di larghezza sulla quale viene allo stesso tempo evaporato l'alluminio e mediante la quale è possibile misurare, dalla sua resistenza elettrica, lo spessore dello strato che viene evaporato. Poichè per gli strati sottili la resistenza specifica dipende dallo spessore, si deve ancora apportare una correzione. Per questo si utilizza la curva indicata nella figura 9. In ascisse sono indicati i valori degli spessori calcolati dalla re

sistenza elettrica (supposto che la resistenza specifica rimanga costante) sulle ordinate sono riportati i veri valori che si ottengono mediante una analisi chimica.

Dopo aver evaporato l'alluminio lo strato di cellulosa viene riscaldato. A questo scopo lo schermo fluorescente viene riscaldato fino a 250 ± 300 gradi (aumento della temperatura di 100° per ora fino a 200° poi circa 30° per ora) e viene mantenuto a questa temperatura per circa due ore.

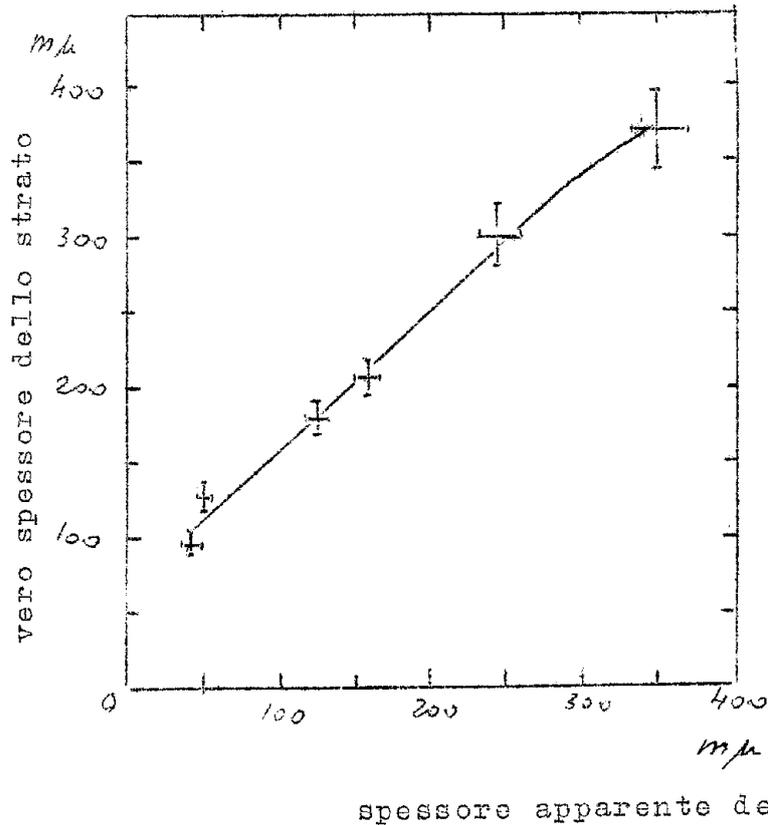


FIG. 6

Se i prodotti della evaporazione dello strato di cellulosa diffondono attraverso lo schermo di alluminio oppure se trovano il loro cammino attraverso dei fori non è molto chiaro ancora. Lo schermo di alluminio ottenuto in questa maniera non resiste alla temperatura spinta fino a 480°C . Se esso era inizialmente molto spesso, dopo il riscaldamento a 480°C sotto il microscopio appare come un cielo stellato. Questo si osserva con spessori dello strato da $100\text{ m}\mu$ a $300\text{ m}\mu$ e indipendentemente dal fatto che lo strato di alluminio aderisca allo strato fluorescente o si trovi da esso staccato al momento del riscaldamento. Queste difficoltà possono essere superate se dopo che la cellulosa è stata evaporata via si fa depositare un secondo strato di alluminio di circa $120\text{ m}\mu$. Un tale doppio strato resiste al riscaldamen-

to a 480°C molto bene: non aumenta il numero delle già presenti buche nè viene cambiata la loro dimensione. Se si tiene poi conto che sulla faccia superiore dell'alluminio viene a formarsi molto rapidamente uno spessore di ossido di circa 50 Å, allora si comprende che un tale sistema di strati ha proprietà meccaniche diverse rispetto a uno strato semplice anche quando il doppio strato di alluminio (circa 200 mμ) non è più spesso dello strato singolo. Infine lo strato fosforescente viene messo per prova in un forno a 480°C e viene bombardato con elettroni ed allo stesso tempo viene misurato, in funzione della tensione di accelerazione degli elettroni, il fattore di amplificazione con un fotocatodo.

Capitolo n° 3 - PROPRIETA' DEL FOSFORO

3) 1 - Il fattore di amplificazione V

3) 1 - 1 - Introduzione

Scopo della ricerca era di scegliere fra alcuni fosfori commerciali i più adatti e provare sotto quali condizioni, in particolare qualora fossero usate piccole differenze di potenziale, si potesse ottenere il più grande possibile fattore di amplificazione.

Oltre alla efficienza del fosforo venne determinata anche la quantità di luce data dal fosforo attraverso uno schermo fluorescente trasparente ed inoltre furono determinate le seguenti grandezze:

- spessore dello strato fosforescente.
- perdite per riflessione sullo strato di alluminio
- perdite di energia degli elettroni nell'alluminio e nello strato assorbente di silicato
- riflessione sulla foglia di vetro di sostegno.

Il coefficiente di riflessione dello strato di alluminio (circa 80% secondo la bibliografia 2) e la riflessione sul vetro sono dati e non possono essere variati. La perdita di energia degli elettroni è a 20 KV trascurabile ma non lo è più a 10 KV: misure di Brill e Klasens (vedi bibliografia 2) danno a 10 KV per gli spessori di circa 200 + 300 mμ una riduzione della quantità di luce dal 18% al 34% rispetto ad uno strato di spessore ottimo di 50 mμ. Gli schermi fluorescenti nell'intensificatore di immagine a 5 stadi sono assoggettati a trattamenti termici piuttosto violenti e pertanto per sicurezza è bene non scendere a spessori inferiori ai 200 mμ.

Anche per lo spessore dello strato fosforescente troppo variazioni non sono possibili. A causa del potere risolutivo si deve avere uno strato il più possibile sottile. Re-
 raltro la superficie di vetro deve essere completamente coperta con lo strato di particelle fluorescenti. La concentrazione di silicato e il tempo di sedimentazione determina

no lo spessore dello strato di silicato assorbito e quindi ne determinano la compattezza. Si può indagare quale influsso abbiano la concentrazione di silicato, e il tempo di sedimentazione sul rendimento luminoso e se lo strato di materiale fosforescente è ancora abbastanza solido con piccole concentrazioni di silicato.

A) 2 - Il dispositivo di misura.

Elettroni di energia da 2 a 20 KV venivano sparati contro lo schermo fosforescente L in esame. Al di là dello schermo si trovava una fotocellula con un fotocatodo di Cesium Antimonio. Venne misurata la corrente del fascetto di eccitazione I_{st} e la corrente di fotoni insieme alla tensione U. V è il rapporto tra la corrente dovuta ai fotoni e la corrente nel fascetto di elettroni.

Un sistema di bombardamento elettronico St forniva elettroni di 1,8 KV di energia i quali attraverso gli elettrodi circolari B_1 e B_2 venivano sparati sullo schermo fosforescente L (vedi fig. 7). La tensione su B_1 era di circa 100 V verso massa, la tensione su L variava tra 0 e 18 KV e la tensione su B_2 era di circa $1/4$ della tensione su L. Il sistema si trovava in un tubo di ottone M, che, per poter cambiare facilmente il catodo, era fissato soltanto alla piastra posteriore che era a sua volta attaccata ad M mediante una flangia. Tra M e B_1 come tra B_1 e B_2 si trovano dei cilindri di vetro di circa 4 cm di lunghezza. Come guarnizioni venivano usati degli O-ring di perbutano. Lo schermo fosforescente era sedimentato sulla superficie di un recipiente di vetro; questo era, come gli altri, fissato mediante un O-ring contro l'elettrodo B_2 . Questo recipiente era reso conduttore mediante un sottile strato trasparente di ossido di zinco per evitare scariche nel caso di schermi non alluminati. L'intero sistema veniva messo a pressione atmosferica. Nonostante le numerose guarnizioni in gomma dopo breve tempo di pompaggio (da una a due ore) si otteneva un vuoto di $2 \cdot 10^{-5}$ Torr.

Su B_1 prima dell'apertura si trova un cilindro Z e quindi una gabbia di Farady F entrambe costruite in nichel.

L'elettrodo B_2 doveva compiere le seguenti funzioni:

- A) a causa del funzionamento a lente di L o di B_2 il fascetto ad alta tensione in L era fortemente focalizzato; tuttavia ciò era indesiderato in quanto se ne otteneva un sovraccarico dello schermo fluorescente e occorreva lavorare con debole intensità di corrente nel fascetto. mediante l'inserzione di B_2 l'effetto di focalizzazione può essere diminuito.
- B) Quando L lavora ad alta tensione le variazioni di potenziale su B_1 possono provocare piccole scariche. Questo viene evitato dall'elettrodo B_2 poichè la tensione tra B_2 e B_1 è relativamente bassa.

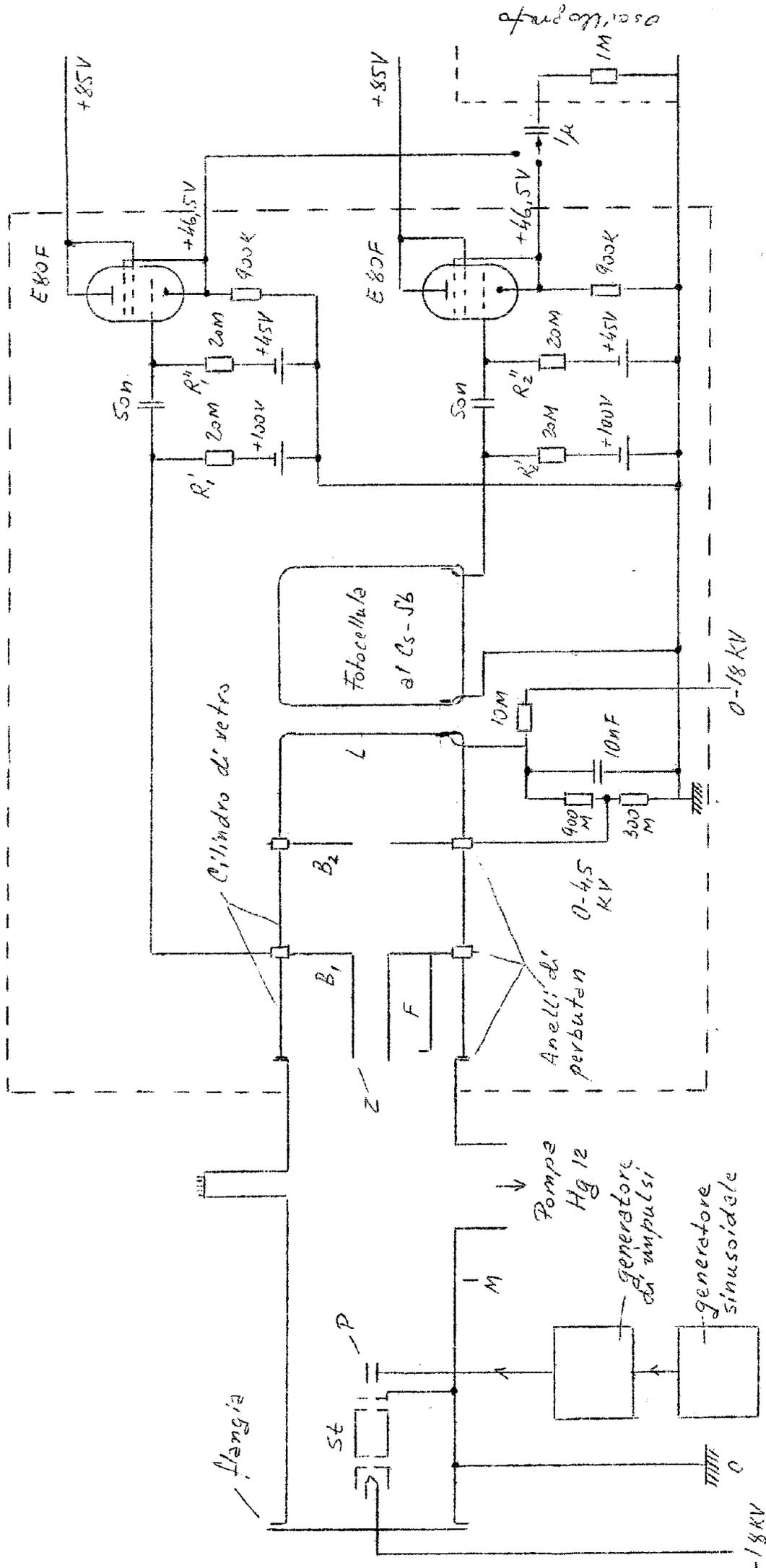
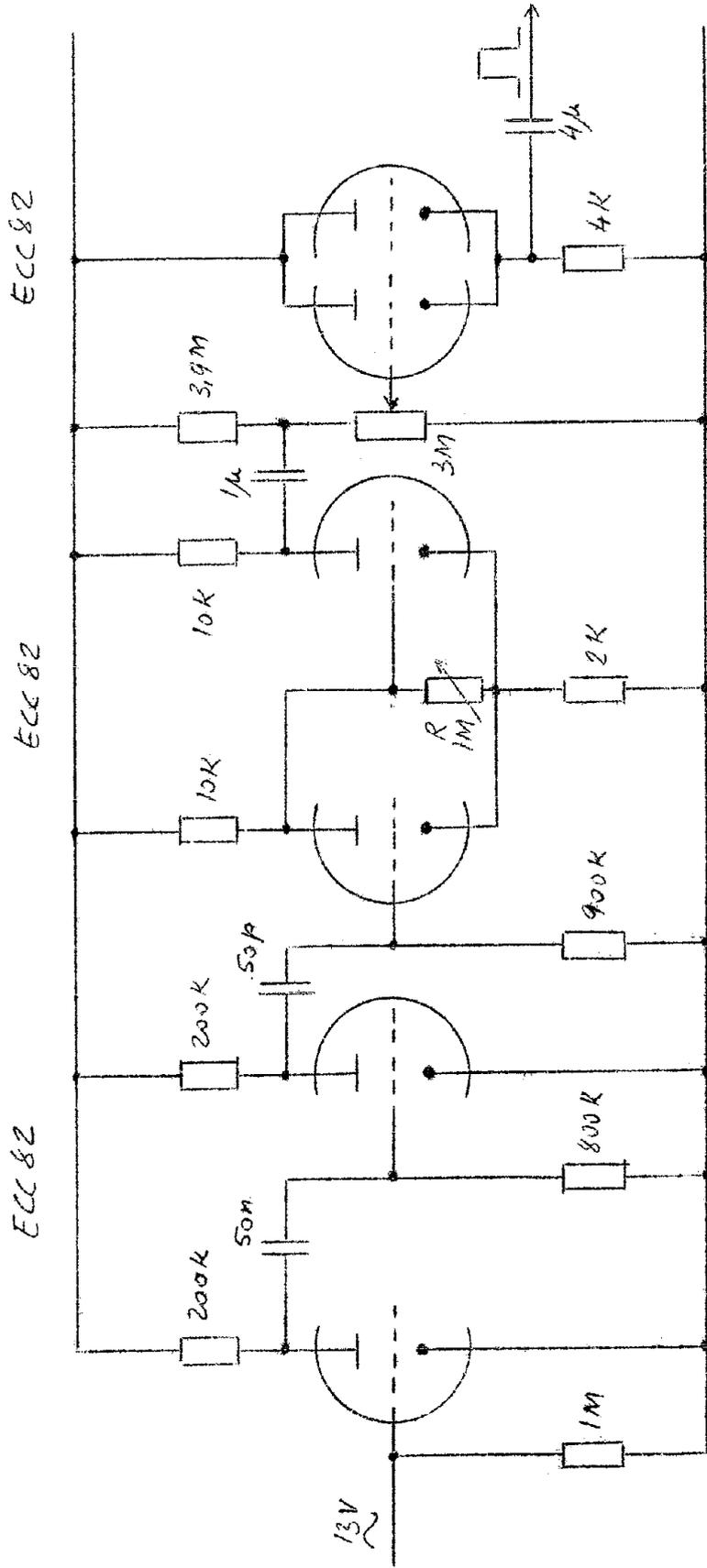


FIG. 7
 APPARECCHIATURA PER LA MISURA DI V.

La gabbia di Farady F che si trova su B_1 serve per la misura di corrente. Mediante la piastra di deviazione P il fascetto di elettroni può essere deviato verso la gabbia di Farady F. Questa è connessa mediante un'alta resistenza R_1' con una sorgente di corrente continua e attraverso un condensatore alla griglia di un catodo follower accoppiato all'indietro. La tensione che si trova su P viene modulata da impulsi di un generatore (vedi fig. 8(+)) in modo che il fascetto di elettroni per la durata degli impulsi viene deviato attraverso B_1 su L. L'impulso di corrente che in questo modo viene provocato in F provoca sulle due resistenze in parallelo R_1' e R_1'' un impulso di tensione che può essere misurato mediante l'oscillografo. Come tubo per l'inseguitore catodico è stato usato il pentodo E80F nella disposizione a valvola elettronica (Piccola tensione anodica; 4,5 V invece di 6,3 V tensione di alimentazione di filamento). Questo tubo è particolarmente adatto per le piccole correnti di griglia. Correnti di circa $5 \cdot 10^{-10}$ Amp possono essere senza difficoltà misurate in questa maniera. Gli elettroni devianti entro la gabbia di Farady possono liberarvi degli elettroni secondari. Dove essere impedito che questi elettroni vadano verso M o verso B_2 a causa del campo elettrico che si trova tra B_2 e B_1 oppure verso L. Questa emissione di elettroni secondari falserebbe la misura di corrente. Si evita ciò mediante una tensione di + 100 V verso M e mediante il cilindro di nichel Z. Un controllo fra la corrente misurata in questa maniera e la corrente che arriva in L misurata mediante un galvanometro mostra che anche per le alte tensioni di L l'errore è inferiore all'1% e pertanto inferiore alla precisione della misura. Immediatamente dietro lo schermo fluorescente si trova una fotocellula a Cesio Antimonio con un diametro del catodo di circa 3 cm. Lo schermo aveva invece un massimo diametro di 4 mm in modo che la maggior parte della luce emessa poteva essere raccolta sulla fotocellula. La corrente nella fotocellula era inviata attraverso un simile inseguitore catodico ad un oscillografo e mediante questo era misurata insieme alla corrente del fascetto di elettroni.

(+) - Il generatore d'impulsi era comandato a onde sinusoidali nel primo doppio triodo l'onda seno viene squadrata mediante interdizione e poi viene differenziata. Con l'impulso differenziato si comanda un multivibratore monostabile (II doppio triodo). Il terzo tubo agisce da catodo follower. L'impulso fu variato tra 0,5 - 25 μ sec.



Generatore di impulsi

Fig. 8

Il tempo di decadimento dei fosfori a solfuro di zinco dipende dalla energia e dalla densità di corrente degli elettroni che li eccitano ed insieme anche dalla durata dell'impulso di eccitazione (vedi paragrafo 3-2-4). Per piccole energie degli elettroni da 2 a 3 KV e densità di corrente di circa 10^{-7} Amp/cm² la fosforescenza può durare più a lungo di 30 millisecondi dopo l'interruzione della eccitazione finchè il fosforo abbia dato via più del 99% dell'energia accumulata.

Il tempo che viene impiegato per raggiungere uno stato di equilibrio tra la quantità della luce emessa e la corrente di elettroni di eccitazione è all'incirca lungo quanto il tempo che impiega il fosforo dopo la interruzione della eccitazione per irraggiare tutta la energia accumulata. Poichè il fattore di amplificazione V nella maniera migliore si può determinare dalla corrente di fotoni nello stato di equilibrio e dalla corrente elettronica si è ritenuto opportuno di fare il tempo di eccitazione del fosforo il più lungo possibile.

Si è dimostrato che 20 millisecondi erano sufficienti. In verità con piccole tensioni di accelerazione non venne sempre raggiunto lo stato di equilibrio: l'errore di misura era però inferiore al 5%. Il tempo di salita del sistema in buone condizioni di funzionamento è di circa 0,25 msec. Questo è determinato dalla capacità di B_1 (circa 25 pF) e dell'anodo della fotocellula (circa 25 pF) con le rispettive resistenze R_1 e R_2 (10 mohm). La frequenza inferiore di taglio del trasduttore è di circa 0,3 Herz. Nel disegno la parte tratteggiata si trova in una cassetta di schermatura.

3) 1-3 - Discussione degli errori.

Gli errori di misura derivano :

- 1°) dalla misura della tensione
- 2°) dalla misura della corrente elettronica e della corrente fotonica.
- 3°) dalla riflessione della luce nel vuoto, così come dalla disposizione del fotocatodo e dello schermo fluorescente
- 4°) dalla costante di tempo del trasduttore.

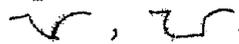
Circa il punto 1°) la tensione era misurata mediante un microamperometro ad equipaggio mobile, (campo di misura 10 Microamper) con tre resistenze di precisione (da circa 4 Watt) in serie per un totale di 1000 Mohm. Lo strumento poteva essere shuntato per un fattore 2. La taratura era fatta mediante un voltmetro elettrostatico (1,5 KV fondo scala) di alta precisione (1%) e con una serie di resistenze. Si otteneva in questo modo per tensioni maggiori di 7 KV una precisione di misura migliore del 2%.

Circa il punto 2°) è importante non soltanto la misura assoluta di questi valori, ma il quoziente tra i due. Il

dispositivo di misura consisteva di resistenze di lavoro e inseguitori catodici o di oscillografo. Circa l'inseguitore catodico con relativa doppia resistenza di lavoro erano da porsi diverse precauzioni: dovevano essere fornite eguali tensioni per eguali correnti nelle resistenze di misura e l'impulso di tensione sul catodo doveva essere proporzionale alla variazione di corrente nella resistenza. La resistenza di catodo aveva un valore molto alto di modo che un cambiamento della transconduttanza del tubo influiva solo poco sul valore del coefficiente di amplificazione dell'inseguitore catodico e questo era praticamente costante nel campo di misura. La uguaglianza tra i due inseguitori catodici era ottenuta e controllata mediante scambio tra le valvole dei due.

La misura era eseguita mediante un oscillografo Hewlett and Packard tipo 130 A. L'altezza utile dello schermo era di 10 cm. La proporzionalità tra la tensione di taratura e la deviazione del fascetto è stata provata. Un errore entro gli errori di precisione di misura non si è potuto rilevare. L'errore del partitore di tensione è del 0,5%. Con 10 cm di deviazione l'errore di lettura era del 0,5%. La corrente di elettroni era durante la misura portata ad un valore che permetteva di utilizzare l'intera altezza dello schermo fluorescente dell'oscillografo, pertanto si poteva ottenere dalla corrente fotonica una minima deviazione di circa 4 cm. L'errore di lettura era pertanto dell'1,3%. In totale si otteneva in questo modo un errore complessivo dell'ordine del 2,5%.

Circa il punto 3°). Non tutta la luce prodotta dagli schermi fosforescenti descritti nel paragrafo 3.1, 4.1 era fatta cadere sul fotocatodo poichè questo in alcuni casi non copriva l'intero angolo solido mentre in altri casi una parte della luce era riflessa sulle superfici e veniva assorbita nel sottile strato dell'ossido di zinco. Le perdite complessivamente subite dalla luce ammontavano a circa il 20-25%. Lo stesso fattore di perdita entrava anche nelle misure descritte nel paragrafo 3.1, 4.2. Poichè l'intensificatore di immagine ha dei fotocatodi che possono variare in efficienza di un fattore circa 2 non è stata introdotta alcuna correzione per questo fattore.

Circa 4; l'impulso di luce aveva una forma come negli schizzi seguenti: .

Questo dipendeva dalla densità di corrente del fascetto di elettroni della tensione di accelerazione degli elettroni e della natura del fosforo (vedi paragrafo 3.3.4). Con tensioni elevate si avvicinava la forma dell'impulso ad una forma rettangolare e pertanto in seguito alla maggiore focalizzazione elettrostatica del fascetto la corrente su L diventava più grande. Mediante la scarica del condensatore nel trasduttore non si ottiene la completa ampiezza dell'impulso. Un errore in questa misura a seconda della forma dell'im-

pulso variava dal 3 all'1%.

Conclusioni: per confrontare i diversi schermi fluorescenti sono importanti prima di tutto le differenze nei diversi fattori di correzione. Gli errori del paragrafo 1 sono uguali in tutte le successive misure. Questi vengono peraltro, con gli errori del paragrafo 2, mediante rappresentazione grafica, in gran parte compensati. Le oscillazioni degli errori del paragrafo 3 ammontano a circa il 5% e gli errori di ciò che è detto nel paragrafo 4 a circa l'1%.

Per l'andamento relativo della funzione $V(U)$ gli errori da 1 a 4 sono importanti, gli errori del punto 3 producono un costante fattore d'errore e gli errori del punto 2 vengono mediati.

3) 1.4.1. - Misure su schermi depositi su superficie di vetro mediante diversi fosfori.

Per avere un panorama di ciò che si può ottenere come fattore d'intensificazione in uno stadio dell'intensificatore d'immagine è stata fatta una serie di misure su diversi fosfori del fattore V in funzione della tensione. I fotocatodi di Cesio-Antimonio utilizzati per queste misure avevano una efficienza di circa 30 microamper per lumen, a questo corrisponde una efficienza quantica di circa il 10%. Lo schermo fluorescente era depositato su dischi di vetro di 10 cm di diametro e 6 cm di altezza mediante sedimentazione.

Nella figura 9 sono dati i risultati delle misure per 6 diversi schermi fluorescenti con diversi fosfori senza schermo posteriore di alluminio. Lo spessore dello schermo di fosforo era scelto in modo tale che la superficie del vetro ne fosse completamente coperta (confronta tavola 2). Tutti gli schermi, salvo quello con Zn_2SiO_4 e quello con $CaMgSiO_4$ erano ottenuti mediante il procedimento descritto nel paragrafo 2.2.

Le curve indicano tra 5 e 17 KV un andamento circa lineare. Verso il basso si avvicinano asintoticamente all'asse delle U , per grandi tensioni esse si piegano verso il basso allontanandosi dall'andamento lineare. Una spiegazione può essere la seguente: la perdita di energia degli elettroni nello strato assorbito di silicato ed una minore luminescenza dello strato che si trova a contatto con la superficie del cristallo diventano sempre più piccole al crescere della tensione fino a non giocare più alcun ruolo nelle grandi tensioni. Le curve dovrebbero per le grandi tensioni avvicinarsi a una retta passante per il punto 0. Peraltro si hanno delle variazioni più forti del previsto.

Probabilmente delle scariche sui cristalli fino a qualche centinaio di Volt sono la causa di ciò.

La fig. 10 fornisce misure circa gli stessi schermi ma questa volta con uno schermo riflettente di alluminio. Esse mostrano fondamentalmente lo stesso andamento delle cur

Fattore di amplificazione in funzione della tensione acceleratrice
 Schermi luminescenti senza strato di Al

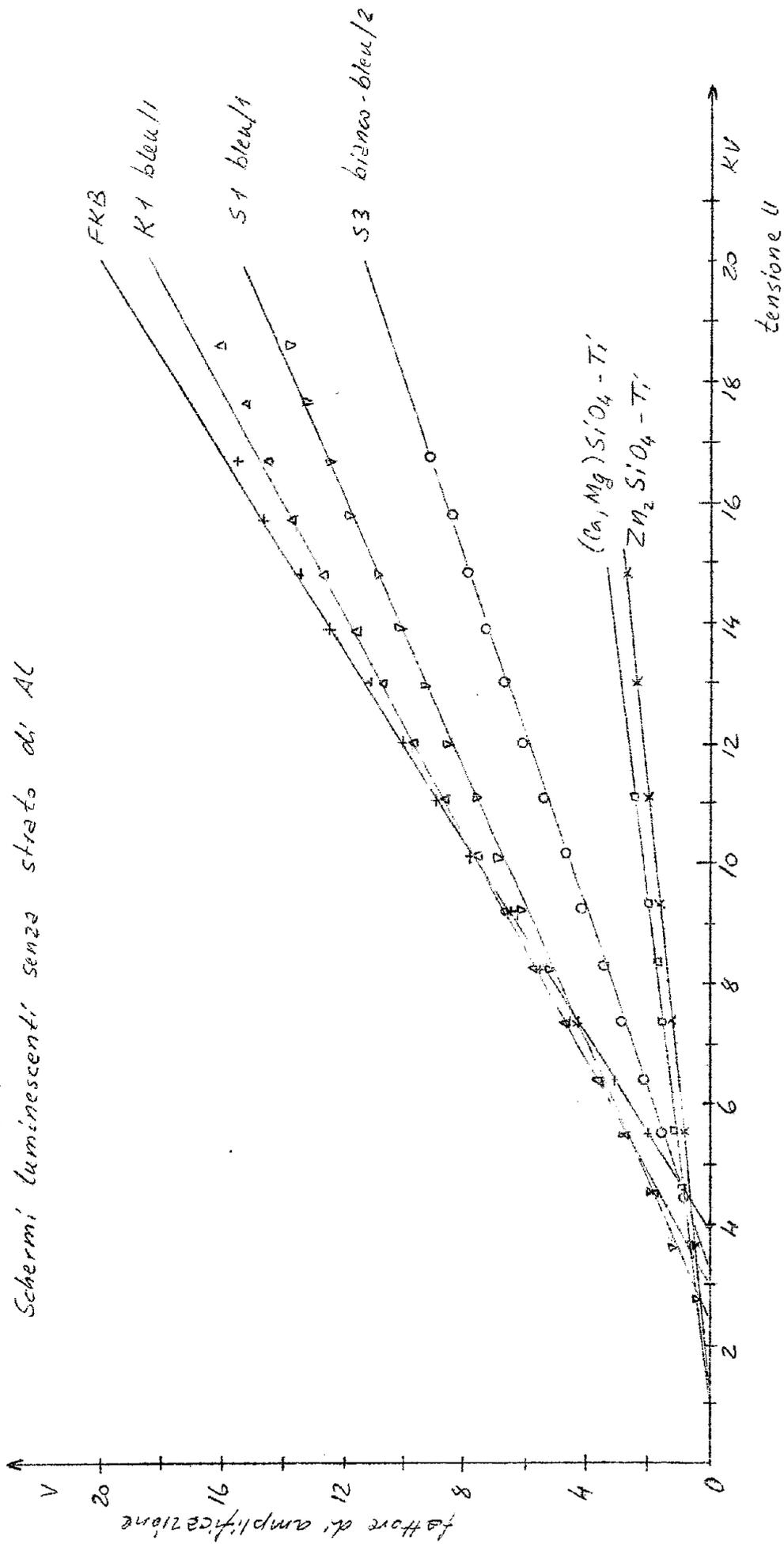
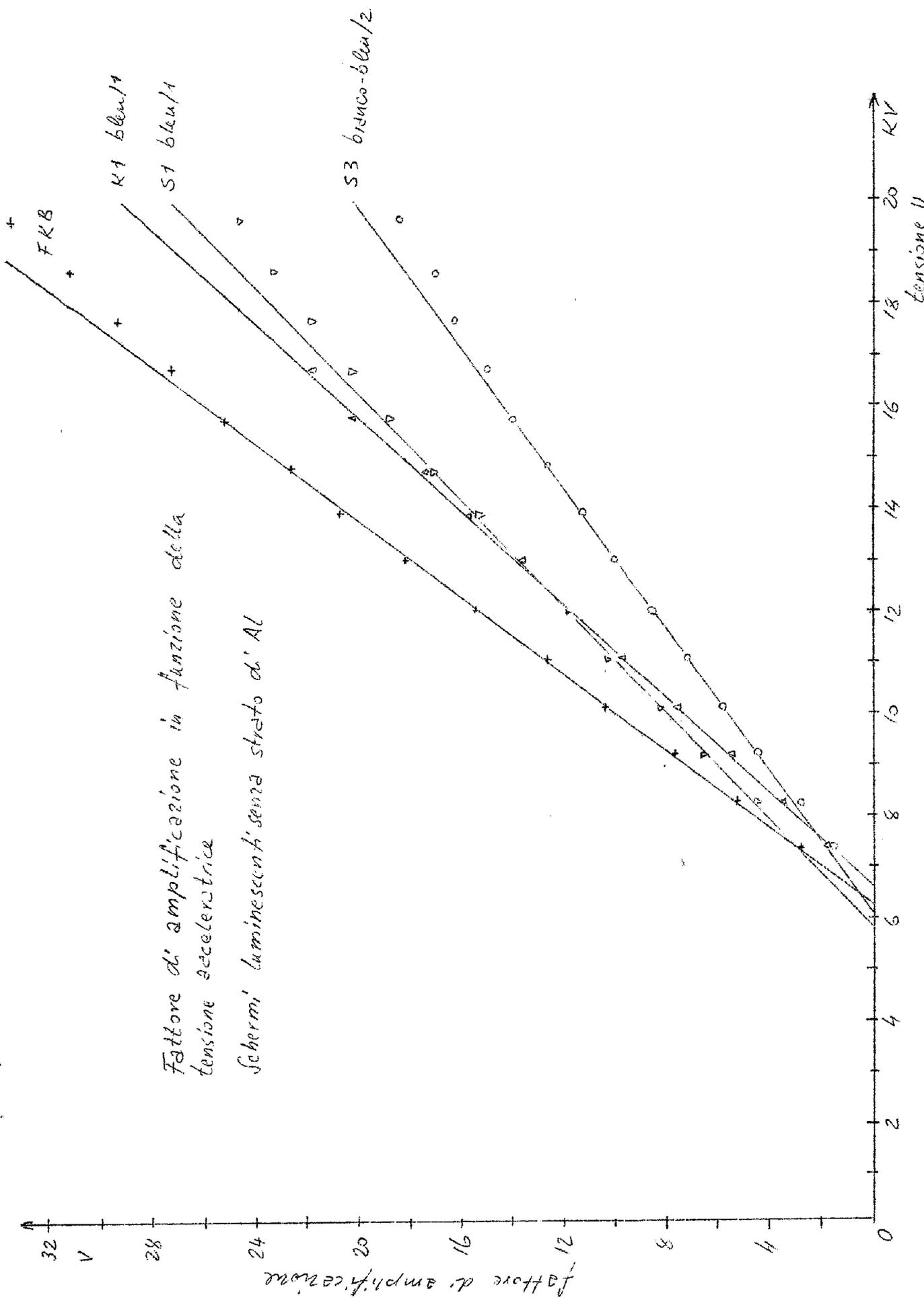


FIG. 9



Fattore di amplificazione in funzione della tensione acceleratrice

Schermi luminescenti senza strato di Al

Fig. 10

ve di fig. 9. Il punto di intersezione delle rette con l'asse delle U è spostato verso destra in seguito alle perdite di energia nell'alluminio. La curva di $K_{I\text{blu}}/1$ si trova relativamente vicina a quella del FKB più in basso di quanto non ci saremmo aspettato. Probabilmente la foglia di alluminio ha casualmente un potere riflettente più piccolo, circostanza che si è presentata anche in altri casi. Il confronto degli schermi non alluminati così come altre misure mostrano però che il fosforo $K_{I\text{blu}}/1$ ed FKB (anche con alluminio) sono uguali tra di loro con deviazioni massime del 7%. Tra fosfori precedentemente nominati, sono stati provati l'FKB e il $K_{I\text{blu}}/1$ a causa della loro buona efficienza, l' $S_1\text{blu}/1$ e l' $S_3\text{blu-bianco}/2$ a causa della piccolezza dei loro grani così come il $\text{CaMgSiO}_4/\text{Ti}$ ed il $\text{Zn}_2\text{SiO}_4/\text{Ti}$ a causa del loro breve tempo di decadimento (da 24 μsec a 5 μsec). Gli schermi $S_1\text{blu}/1$ e $K_{I\text{blu}}/1$ differiscono secondo i dati delle ditte fornitrici soltanto per la dimensione dei grani.

Il confronto tra i diversi fosfori si può fare nella maniera migliore mediante un'alta tensione perchè in quel caso le perdite di energia negli strati che non producono fosforescenza sono piccole nel loro effetto. Un confronto nel tempo di salita è importante soltanto quando il punto di intersezione con l'asse delle U giace molto vicino per due diversi tipi di fosfori. Nella tabella 2 è dato il confronto per $U = 16,7 \text{ KV}$. I due silicati sono di un fattore 4, rispettivamente 5, peggiori che il miglior solfato FKB. Secondo le misure di Brill e di Clasens (vedi bibliografia²) il rapporto dovrebbe essere circa come 1 + 3. Probabilmente qui lavorano i diversi spettri di emissione. Per un terzo alluminato schermo fosforescente con $\text{Zn}_2\text{SiO}_4/\text{Ti}$ è stato trovato il rapporto di 1 : 5 (vedi fig. 12).

Fosforo	Spessore dello strato in mg/cm^2	Concent. % di silic	Spess. V(16.7KV) strato senza Al $\text{Al}\mu$	V(16.7KV) con Al	$\frac{V_{\text{con Al}}}{V_{\text{sen. Al}}}$
FKB	3	6	260	15,6	1,75
K1 blu/1	3	6	275	14,4	1,48
S1 blu/1	2	6	290	12,5	1,65
S3 bianco blu/2	2	6	270	9,1	1,66
$(\text{Ca}, \text{Mg})\text{SiO}_4$	1,5	1,5	3,8		
Zn_2SiO_4	1,5	0	3,2		

Tabella 2.

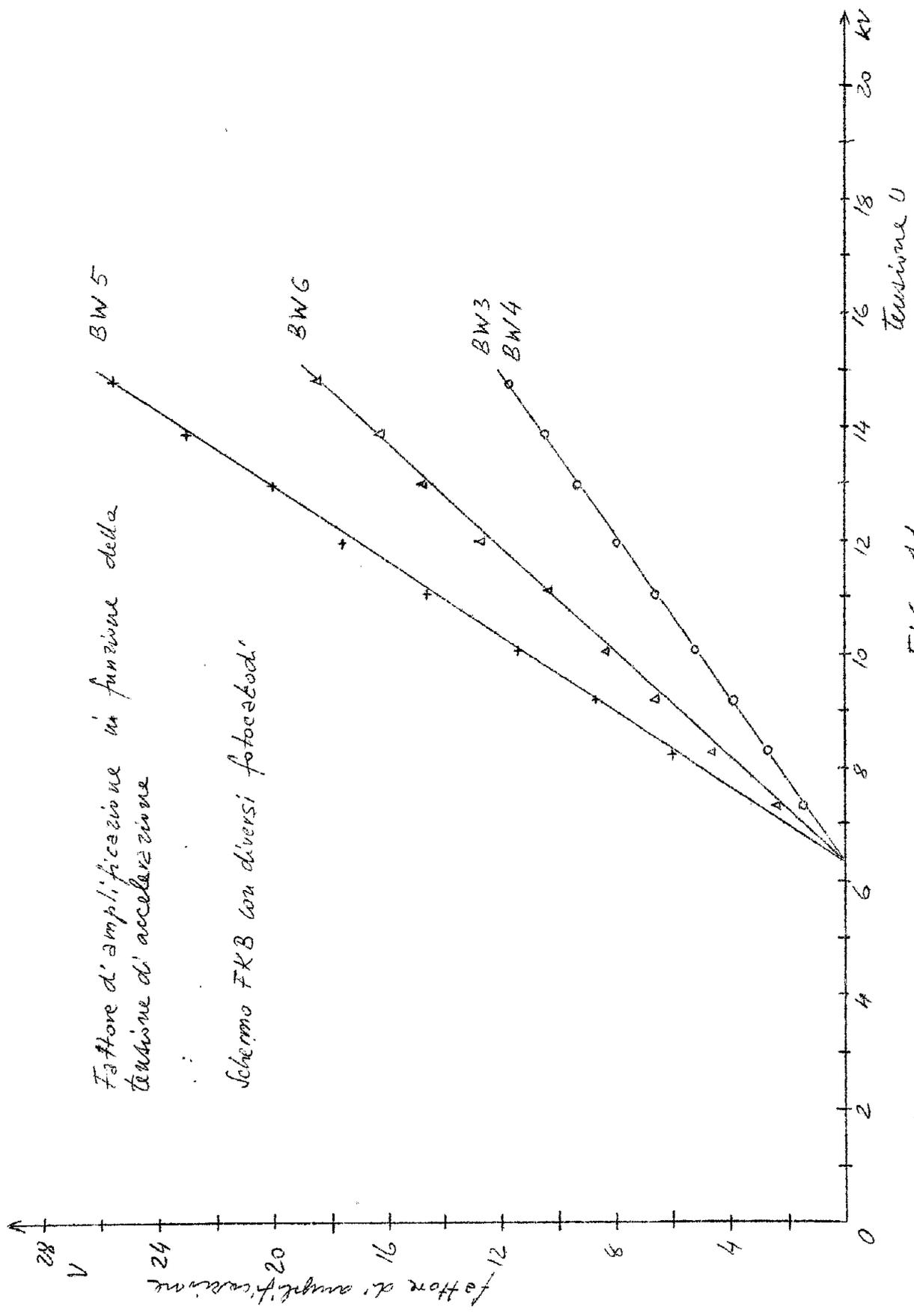


FIG. 11

Risposte luminose su diversi schermi
luminescenti con strato di Al.-

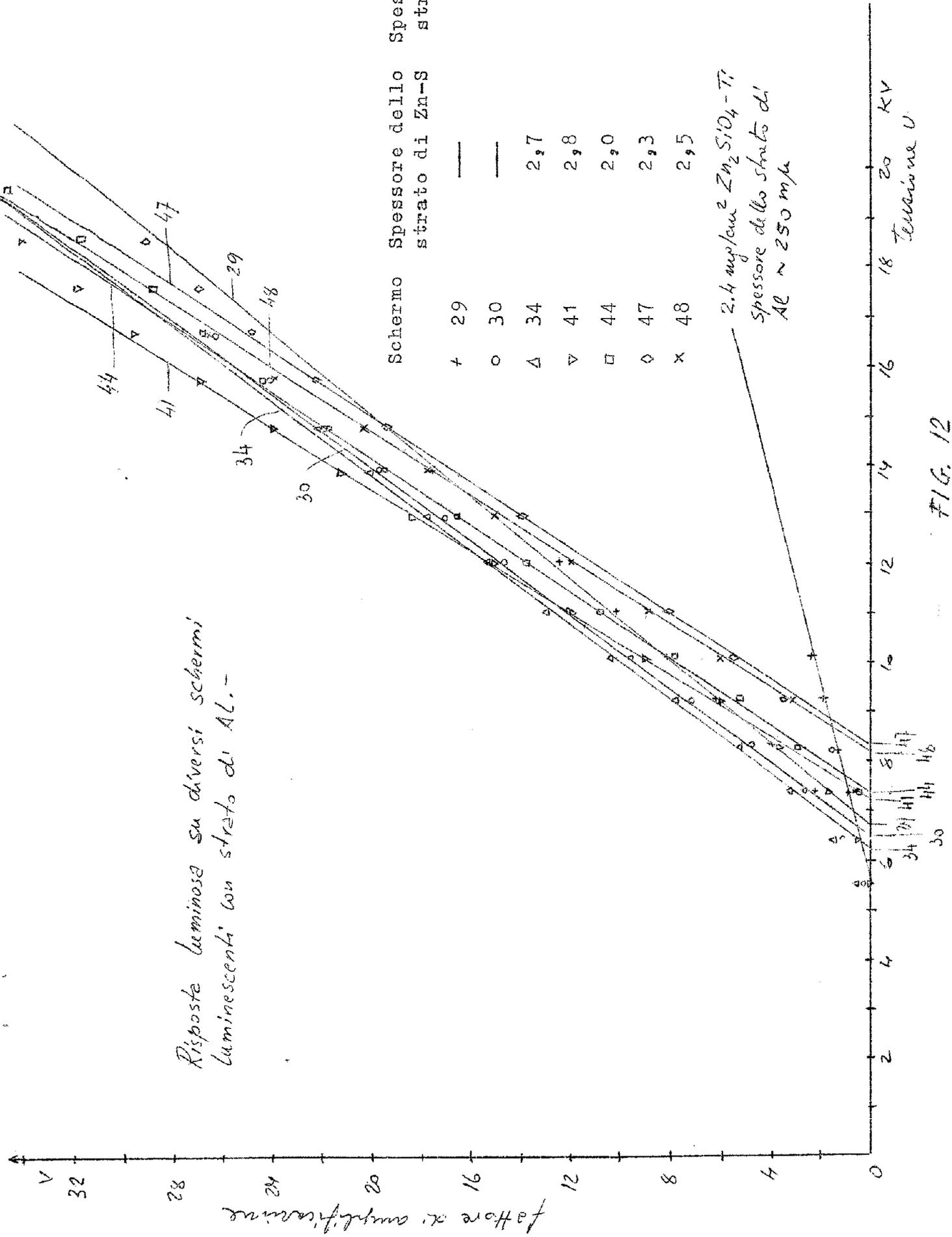


FIG. 12

Proprietà di alcuni strati fosforescenti.

La terza colonna dà la concentrazione in silicato al momento della produzione. Il 6% in peso corrispondono ai valori dati nella sezione 2.2. Il rapporto silicato acido acetico è in tutti i casi medesimo.

I fotocatodi dell'intensificatore di immagine non risultano sempre uguali tra di loro. Le misure indicate nelle figure 9, 10 e 12 sono ottenute con i migliori intensificatori ad uno stadio costruiti sinora e con il migliore fotocatodo, (indicato in laboratorio BW5). Nella figura 11 sono date le misure con 4 fotocatodi e lo stesso schermo fluorescente. BW3 e BW4 sono relativamente peggiori. La ragione di ciò dovrebbe essere l'effetto descritto nella sezione 1-2 F4 del cesio sul solfuro di zinco. Tutte queste misure indicano che anche con i peggiori fotocatodi a 14 KV si ottiene un fattore di guadagno di 10.

3.1.4.2. - Misure su schermi FKB su foglie di vetro.

La figura 12 dimostra infine ancora una serie di misure su schermi alluminati con fosforo FKB che per gli scopi dell'intensificatore di immagine è sedimentato su sottili foglie di vetro ed è stato riscaldato a 480°C. Per la misura esse erano disposte per precauzione su di un anello di alluminio. Questo era fissato nel sistema irraggiante esattamente come le fenditure B1 e B2 nella fig. 7. Come chiusura veniva utilizzata una piastra di vetro come descritto nella sezione AI2. Gli schermi fluorescenti 30-44-47-48 sono stati disposti dentro il primo intensificatore di immagini a 5 stadi.

La figura 12 ha chiaramente il seguente risultato: per tensioni di 16,7 KV i valori del parametro V assumono una relativamente grande dispersione con punto medio interno a $V = 27$. Lo schermo 41 mostra un allontanamento dalla media di circa il 10% verso l'alto. Il 47 e il 29 si riducono circa del 12,5% verso il basso. Non è ben chiaro come si possa trarne una diretta dipendenza dalla preparazione e dallo spessore del fosforo e dello strato di alluminio. Probabilmente le differenze sono in parte dovute a diversi coefficienti di riflessione dello schermo di alluminio. Anche lo spessore del collante può in qualche modo variare.

La figura 12 mostra ancora delle misure su uno schermo alluminato di Zn_2SiO_4/Ti che come gli schermi FKB è stato sedimentato su di una foglia di vetro. Si vede che la V a 17 KV come per gli schermi indicati nel paragrafo 3.1.4.1. è più piccola di un fattore 5 che per gli schermi FKB.

3.1.4.3.) - Influsso della concentrazione del silicato e del tempo di sedimentazione.

Mentre con grandi energie degli elettroni, 20 KV, le

perdite di energia negli strati non fosforescenti non sono rilevanti per tensioni minori esse viceversa possono essere osservate. Poichè negli intensificatori di immagine ad uno stadio già tra 10 e 13 KV nonostante la distanza di 6 cm tra il fotocatodo e lo schermo fluorescente si possono osservare delle scariche sulle pareti del vetro e con ciò la tensione di accelerazione ha un limite superiore, si è provato come le curve di amplificazione vengano variate, se nella sedimentazione dello schermo fluorescente nella soluzione si utilizzano delle più piccole concentrazioni di silicato. Dalla fig. 13 si osserva che il punto di intersezione con l'asse delle U interno ai 2 KV viene spostato verso sinistra mentre la concentrazione di silicato dal 6% viene abbassata fino al 2 e al 3%. Anche il tempo di sedimentazione, cioè il tempo tra l'inizio della sedimentazione e l'essiccamento della soluzione ha una notevole influenza, per quanto non così rimarchevole, sull'assorbimento del silicato. La fig. 14 mostra delle misure su 2 schermi con un tempo di sedimentazione da 2 a 3 ore. Poichè probabilmente anche la temperatura ha una influenza entrambi gli schermi sono stati formati allo stesso tempo e esattamente alle stesse condizioni.

Circa la preparazione degli schermi si può dire quanto segue: con una concentrazione di silicato di circa il 6% si ottengono degli schermi discreti come è stato mostrato nel frattempo. Col 2% si possono ancora ottenere degli schermi fluorescenti; la efficienza però ne viene aumentata soprattutto negli schermi formati da fosforo a grana sottile come l'S₁blu/1 e meno negli schermi tipo FKB. Per ragioni di sicurezza per l'intensificatore di immagini a 5 stadi inizialmente sono stati usati schermi fosforescenti col 6% di soluzione di silicato.

3.2) - Andamento della emissione di luce nel tempo

Sezione 3.2.1.) Introduzione

Come è chiarito nella sezione I è non solo importante avere un fosforo che abbia un rapido tempo di decadimento, ma anche occorre conoscere l'andamento della emissione di luce nel tempo. Contrariamente a quanto accade per altre applicazioni qui in questo caso non è tanto importante l'andamento nel tempo della intensità di luce L, cioè la funzione $L=L(t)$ ma è importante quale frazione della energia accumulata dopo il tempo τ viene omessa cioè:

$$\frac{\int_0^{\tau} L dt}{\int_0^{\infty} L dt}$$

Di questa frazione il primo stadio vede ridotto il proprio fattore di guadagno nel caso che il secondo stadio

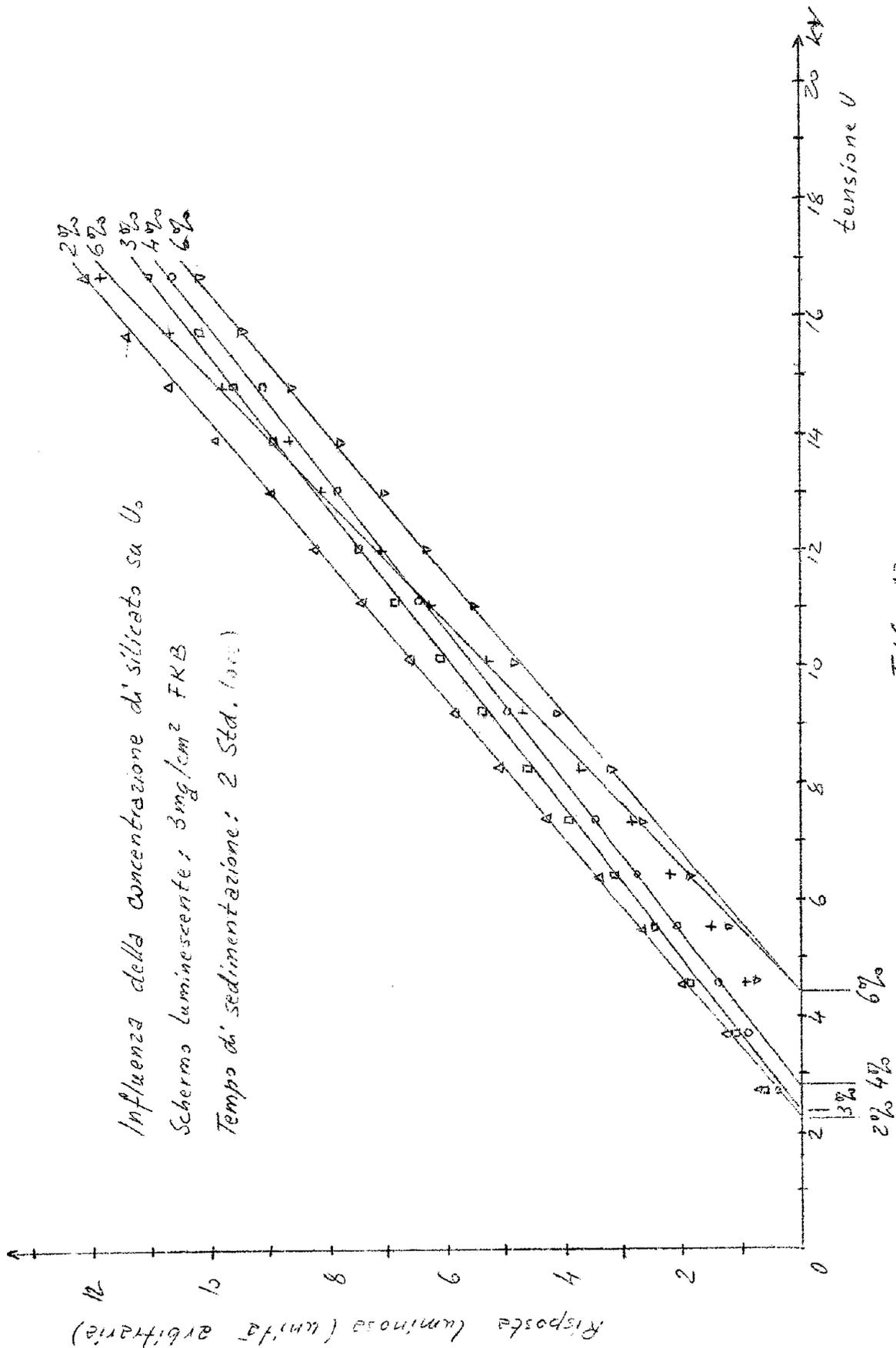


FIG. 13

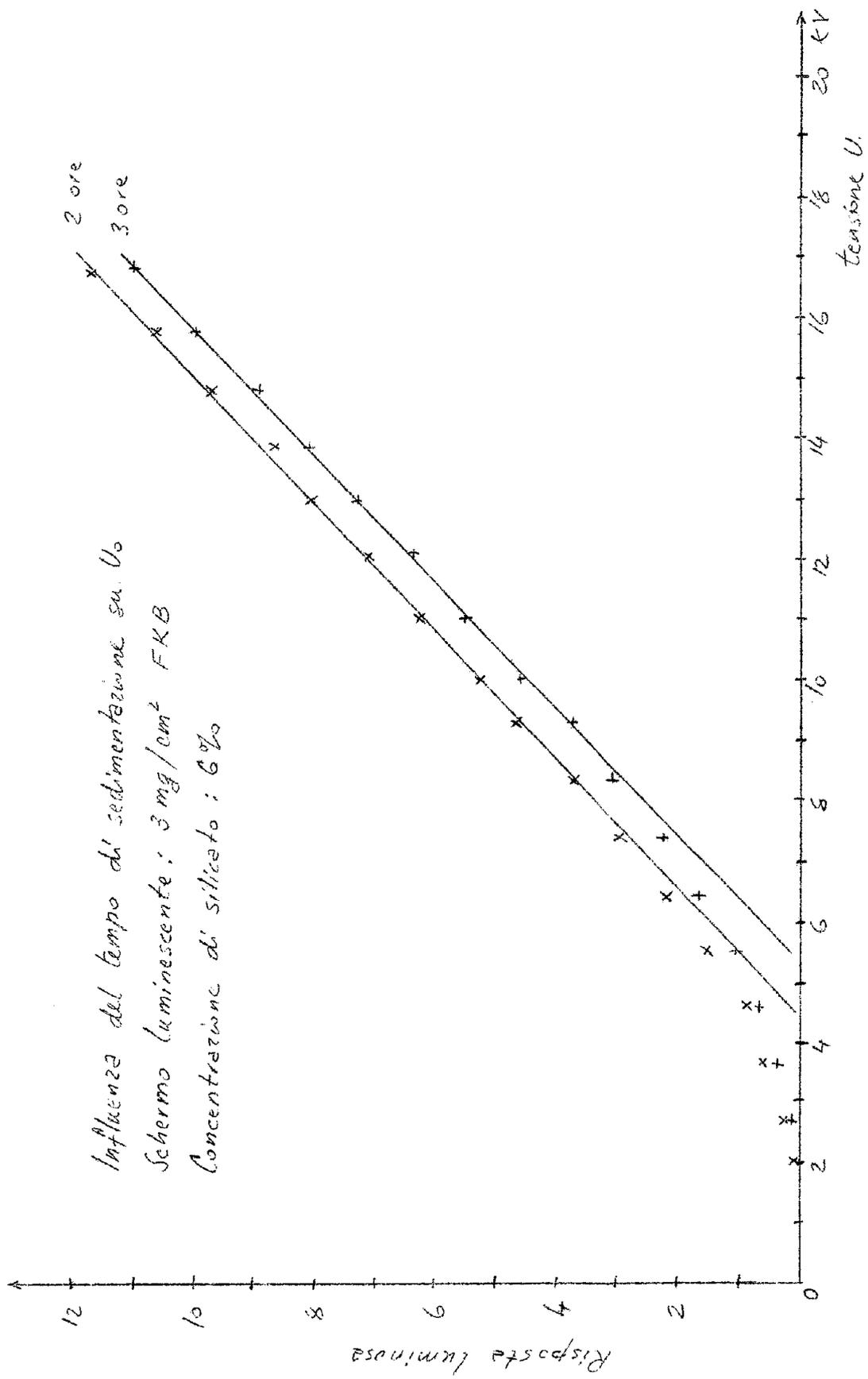


FIG. 14

venga impulsato per un tempo τ .

Se l'intensità decresce con una funzione:

$$(1) \quad L = L_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}}$$

allora la frazione di energia accumulata nel fosforo nel tempo τ che in seguito verrà indicata con $R=R(\tau)$ è proporzionale ad L :

$$(2) \quad R = e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}$$

dopo il tempo 2τ per es., tanto $L(t)$ come $R(t)$ sono diminuite del 14% l'86% della energia accumulata viene irraggiata. Fondamentalmente diverso è ciò che avviene per quel gruppo di fosfori per i quali il decadimento dell'emissione di luce è dato approssimativamente dalla formula:

$$(3) \quad L = L_0 \cdot \frac{1}{(1+\alpha t)^\beta}$$

A questo gruppo appartengono anche i fosfori al solfuro. Infatti si ha:

$$(4) \quad \int_0^\tau \frac{dt}{(1+\alpha t)^\beta} = \frac{1}{\alpha(\beta-1)} \left(1 - \frac{1}{(1+\alpha\tau)^{\beta-1}} \right)$$

e quindi:

$$(5) \quad R = \frac{1}{(1+\alpha\tau)^{\beta-1}}$$

Si vede che $L(t)$ decresce notevolmente più rapidamente che $R(t)$ e che $R(t)$ a un tempo τ può ancora avere una considerevole ampiezza mentre $L(t)$ praticamente non è più osservabile.

E' certamente possibile che, nel campo misurabile, l'andamento dell'intensità sia molto bene approssimato dalla funzione trovata per $L(t)$, ma che dopo di ciò si discosti notevolmente dai valori sperimentali. (Diverse possibilità verranno discusse nella sezione 3.2.4.). Invece è impossibile dall'andamento misurato di $L(t)$ ed $R(t)$ trarre delle conclusioni su quest'ultima funzione. $R(t)$ pertanto mediante integrazione elettronica con grande costante

di tempo potrebbe essere ricavata da $L(t)$.

Sono stati indagati tempi di decadimento dei fosfori a solfuro di zinco e la componente blu FKB di schermi portati precedentemente alla temperatura di 480°C . Nel frattempo debbono essere trovate le risposte alle seguenti domande:

- Dopo quale tempo il fosforo ha emesso circa il 50% dell'energia accumulata?
- L'andamento nel tempo della fosforescenza dipende dal tipo di eccitazione?

3) 2-2 - Il dispositivo sperimentale

Le misure sono state fatte mediante l'apparato descritto nella sezione 3.1.2). La fotocellula era sostituita da un fotomoltiplicatore a 15 stadi del tipo 55AVP. Il sistema di cannoncino di elettroni era impulsato per 30ps. Il tempo di salita era di circa 20 μsec . Il fascetto di elettroni era inizialmente deviato nella gabbia di Faraday e dopo 20 μsec per 1,2 fino a 8,9 msec era inviato sullo schermo fluorescente (vedi fig. 15)^(°).

I tempi di salita e di discesa dell'impulso di irraggiamento sullo schermo fosforescente erano inferiori a 0,2 μsec misurati dal 10 e 90%. La densità di corrente era tra 3 per 10^{-7} A al cm^2 e 1,4 per 10^{-5} A al cm^2 . Poichè la grandezza dei grani è di ca. 10 μ cadevano su ciascun grano da 2 a ca. 750 elettroni per impulso. La tensione di accelerazione era di 13 KV. L'impulso di luce prodotto nello schermo fluorescente era mutato in un impulso di corrente per tramite di un fotomoltiplicatore che aveva un guadagno di 10^7 . Questo impulso poi era mandato direttamente ad un oscillografo con larghezza di banda di 2 MHz , oppure veniva integrato con una costante di tempo di 9,5 sec.

Con densità di corrente da $3 \cdot 10^{-7}$; $5 \cdot 10^{-7}$; $7,6 \cdot 10^{-6}$ e $1,3 \cdot 10^{-5}$ Amper/ cm^2 ; con 1,2 microsecondi o $1,37 \cdot 10^{-5}$ A/ cm^2 con 8,9 μsec di lunghezza di impulso la curva integrata dell'andamento della fosforescenza nel tempo è stata disegnata fotograficamente con velocità orizzontali di 20 μsec al cm fino a 50 msec al cm. La figura 17 mostra una serie di queste fotografie.

^(°) - Le ragioni per cui il funzionamento inizialmente non si manteneva stabile erano:

- a) La parte del pannello di elettroni che era deviated sulla gabbia di Faraday era troppo piccola e causava un fondo che doveva essere soppresso.
- b) La resistenza di fuga della gabbia di Faraday era proporzionale alla intensità di corrente di radiazione.

L'altezza degli impulsi venne misurata con l'oscillografo e da questa fu dedotta l'intensità di corrente. Con una durata di impulsi di 30 μsec era sufficiente una relativamente piccola larghezza di banda dei trasduttori.

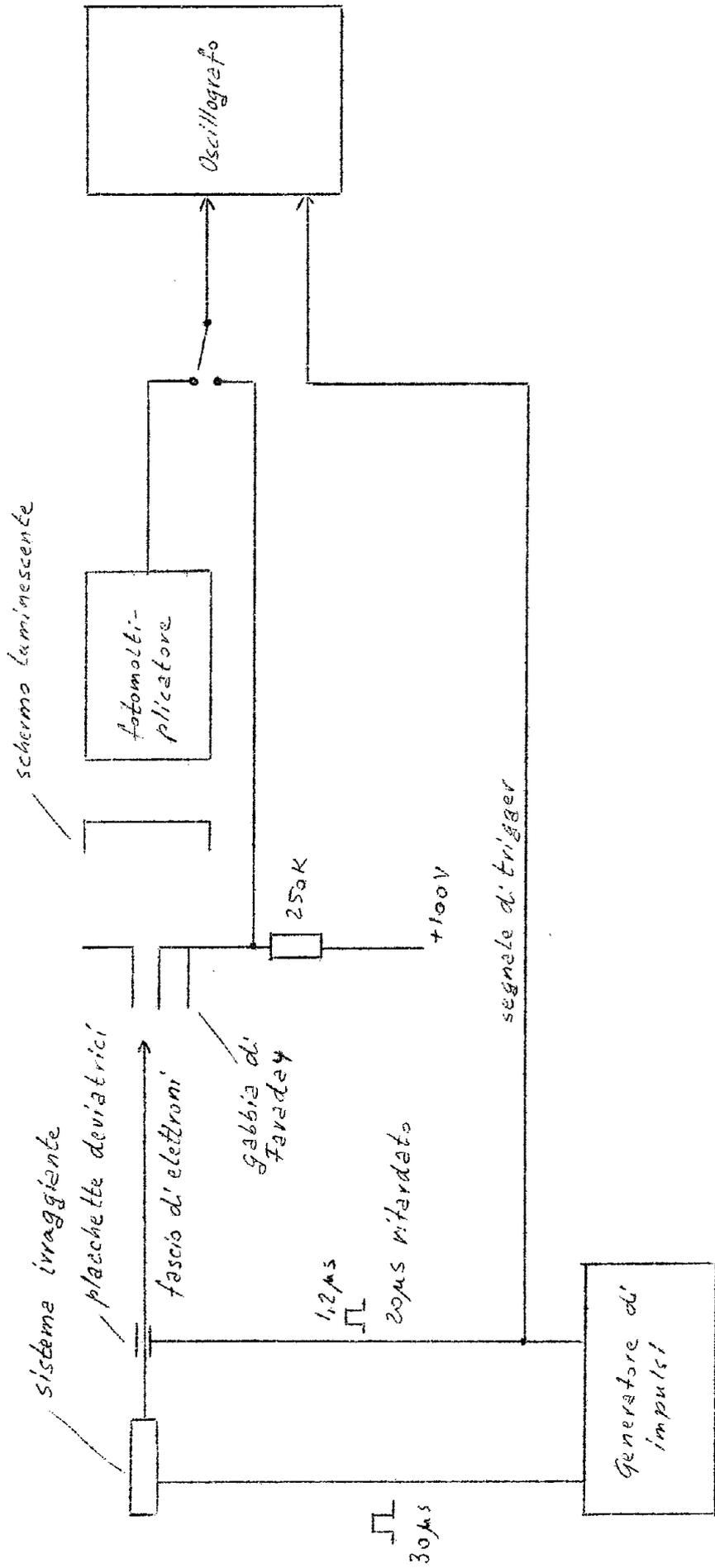


FIG. 15

Misura dell'andamento della luminescenza nel tempo

55 AVR

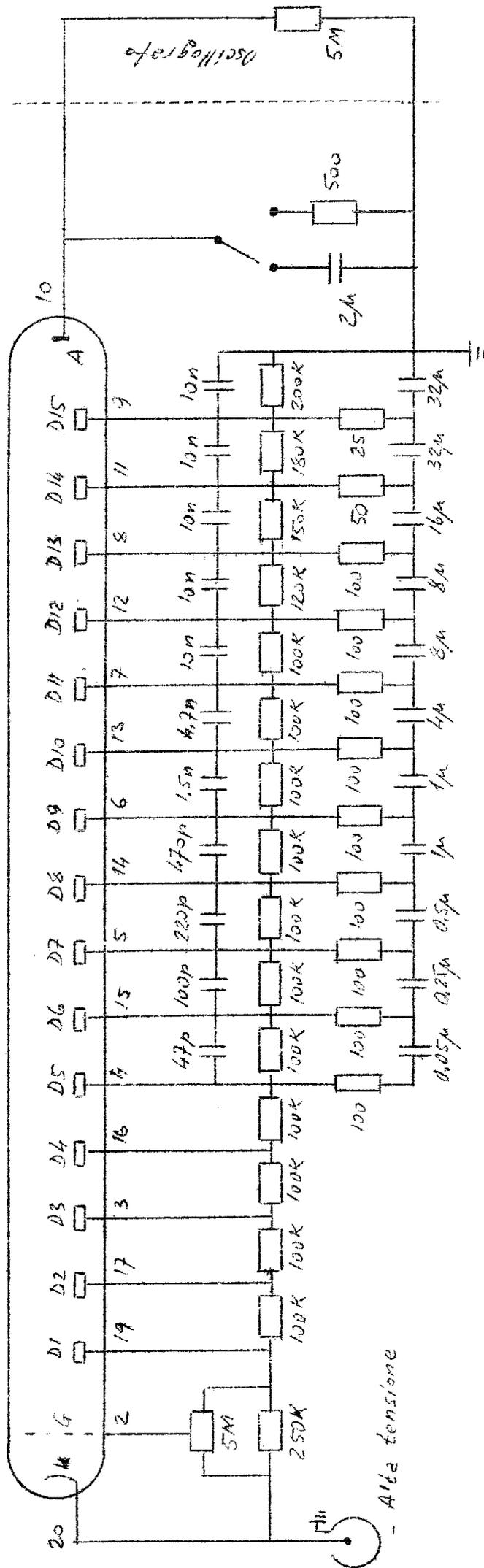
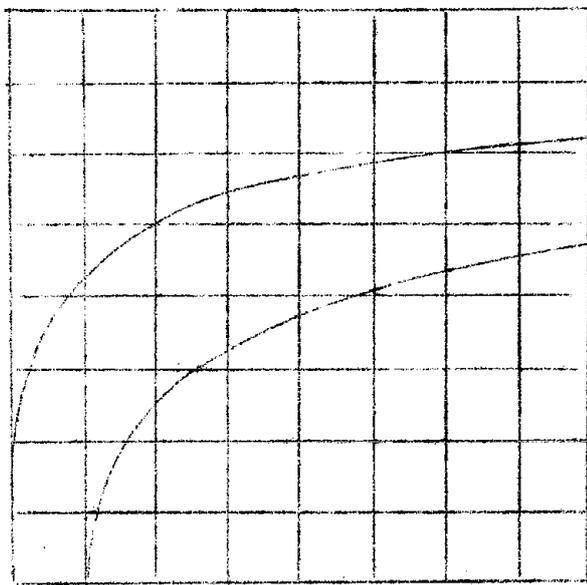


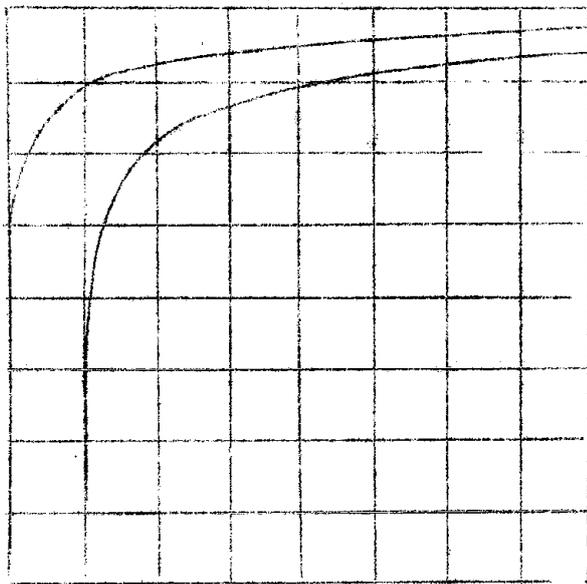
FIG. 16
Circuito del Automoltiplicatore



FKB
 $1300 \cdot 10^{-10} \text{ A cm}^{-2}$
 $12 \mu\text{s}$

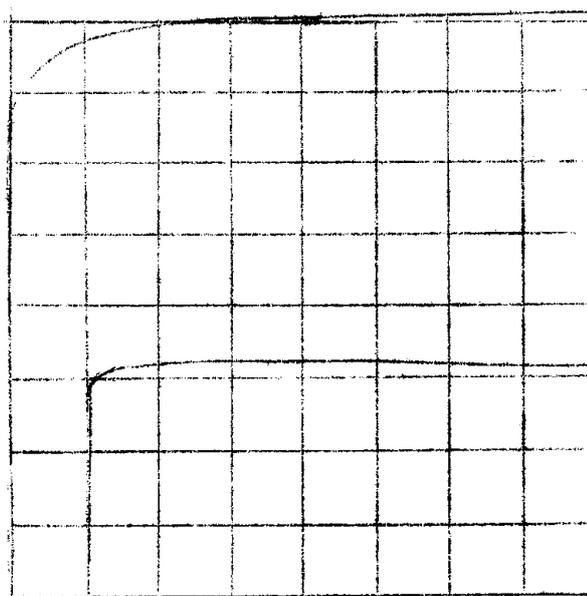
← $100 \mu\text{s cm}^{-1}$

← $20 \mu\text{s cm}^{-1}$



← $2 \mu\text{s cm}^{-1}$

← $500 \mu\text{s cm}^{-1}$



← 10 ms cm^{-1}

← 50 ms cm^{-1}

FIG. 17

Integrazione elettronica delle curve di andamento della luminescenza nel tempo. →

Doveva essere dedotto il valore:

$$R = 1 - \int_0^{\tau} L dt / \int_0^{\infty} L dt$$

$\int_0^{\tau} L dt$ era proporzionale alla tensione sul condensatore di integrazione al tempo τ .

$\int_0^{\infty} L dt$ corrispondeva alla tensione dopo la fine dell'impulso di luce. Questo valore poteva esser letto nel massimo della curva a 50 msec per cm. Il susseguente calare era dovuto a una scarica del condensatore entro una resistenza in parallelo. Inizialmente si era pensato che all'istante in cui si raggiunge il massimo la luce emessa per fosforescenza fosse cessata. Nelle valutazioni quantitative si tenne conto che il condensatore a questo istante ha perduto circa l'1% della sua carica.

Poichè l'intensità di corrente del fascetto elettronico era soggetto a piccole variazioni in ciascuna fotografia doveva essere letto il valore massimo. Pertanto la intensità del fascio dell'oscillografo era regolata in modo che il fascio nella posizione di riposo non dava una intensità completamente nulla. Dopo ogni deviazione il fascetto direttore dell'oscillografo tornava alla posizione di partenza e mostrava in quel punto l'ulteriore andamento della tensione del condensatore. Il limite superiore della striscia verticale all'inizio della curva da in questo modo il valore massimo.

3.2.3. - Misure

Le fig. 18 da a) fino ad e) danno i valori delle fotografie a cui si è accennato precedentemente. Su carta logaritmica è disegnato il valore della funzione $R(t)$ in funzione di t .

Si hanno dalle curve: dopo cento μ sec il fosforo è decaduto al 50% della propria energia da irraggiare.

L'andamento della fosforescenza non cambia apprezzabilmente se si passa da 2 a 700 elettroni che cadono in meno di 10 μ sec su un singolo granello di materiale fosforescente.

Con uno schermo di silicato di zinco nel primo stadio dell'intensificatore di immagine il secondo stadio dovrebbe essere impulsato per almeno 10 μ sec (per Zn_2SiO_4/Ti si ha $\tau_0 = 5 \mu$ sec con decadimento esponenziale della intensità di fosforescenza). In questo tempo il fosforo al solfuro FKB precisamente ha emesso soltanto circa il 20% della sua energia luminosa; poichè però il Zn_2SiO_4/Ti secondo le misure date della sezione 314 ha un fattore di amplificazione di soltanto il 20% di quello del fosforo FKB entrambi i fosfori si comportano ugualmente con questo tem

Fosforo FKB
 Densità di corrente $3.10^{-7} \text{ A cm}^{-2}$
 Durata dell'impulso $1,2 \mu\text{s}$

$$R(t) = 1 - \frac{\int_0^t L dt'}{\int_0^\infty L dt'}$$

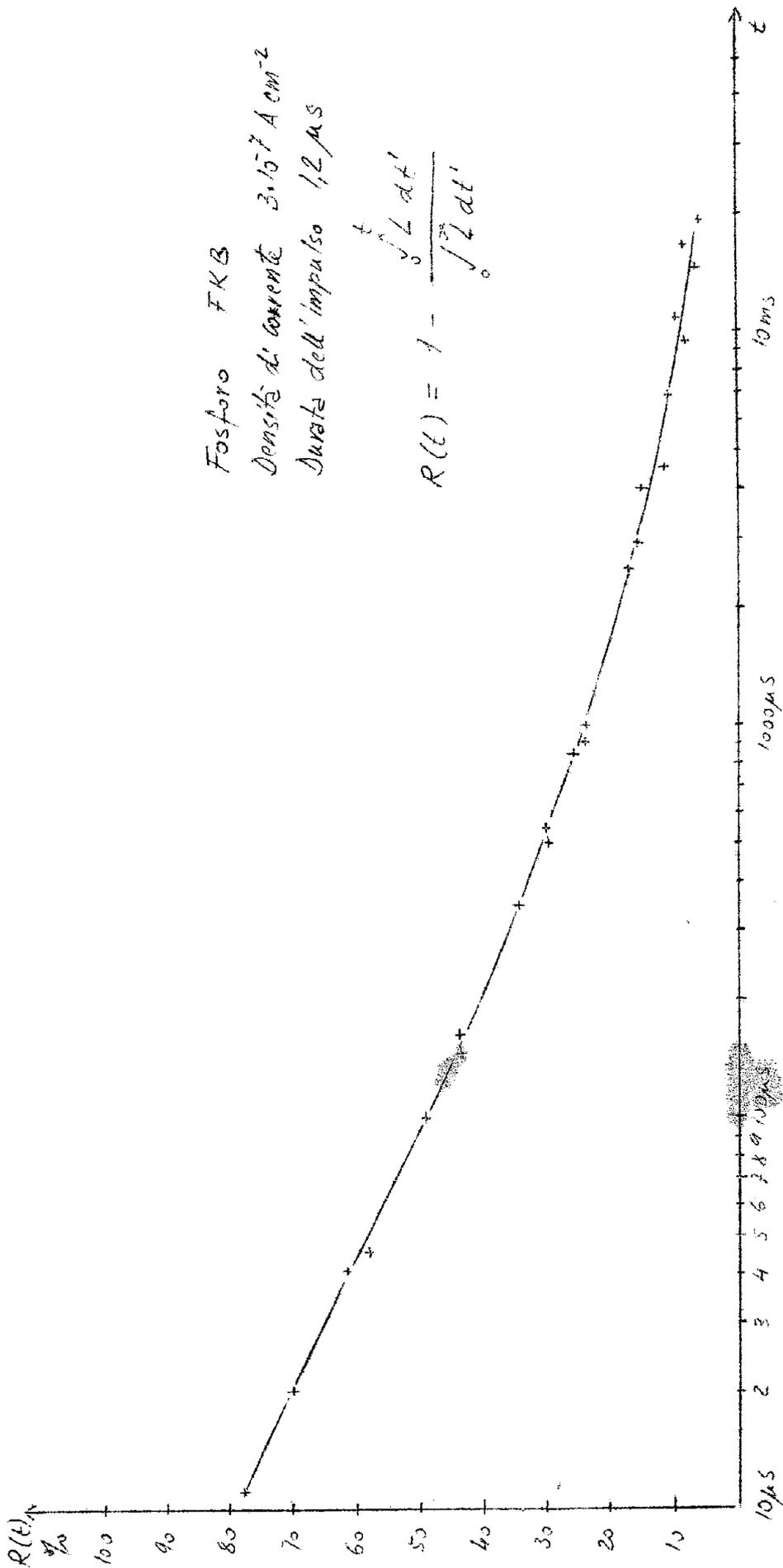
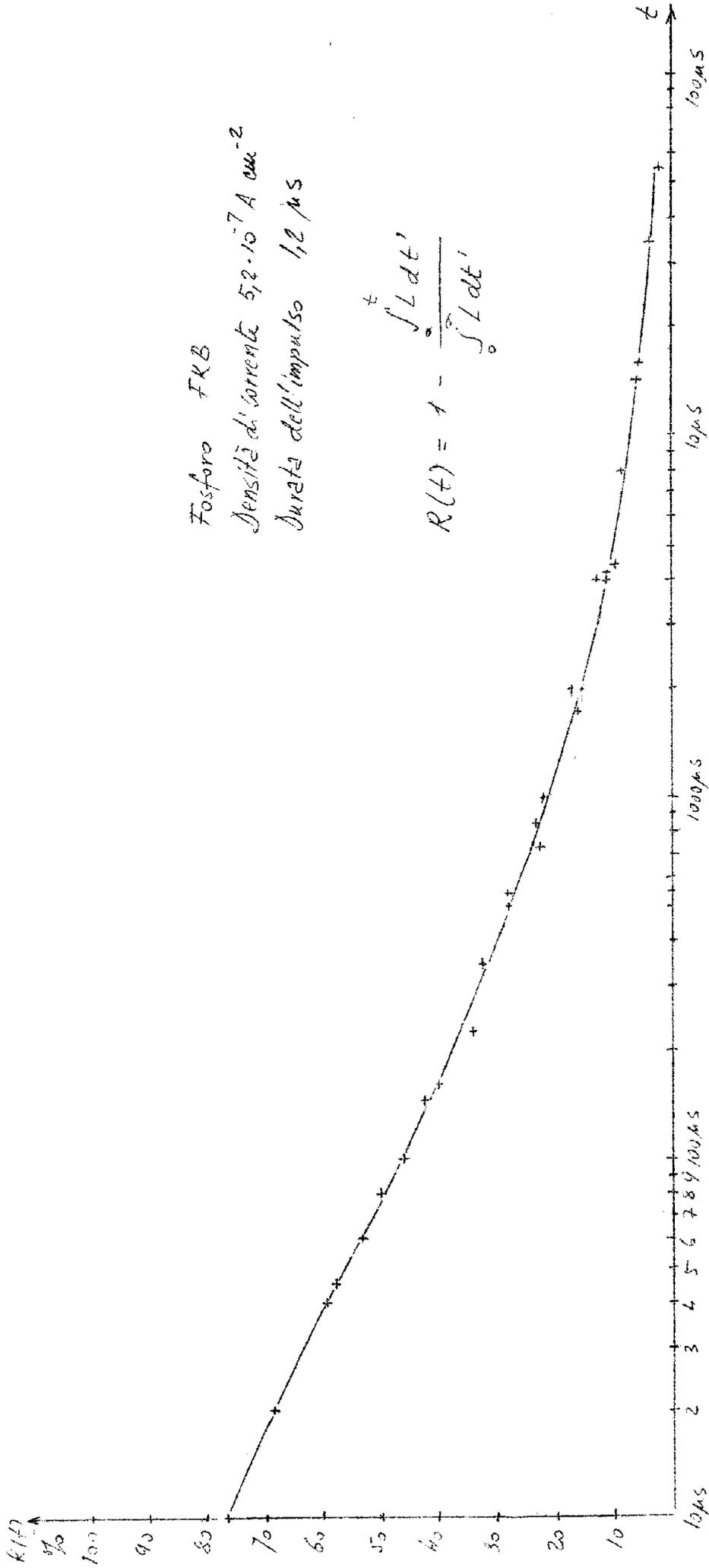
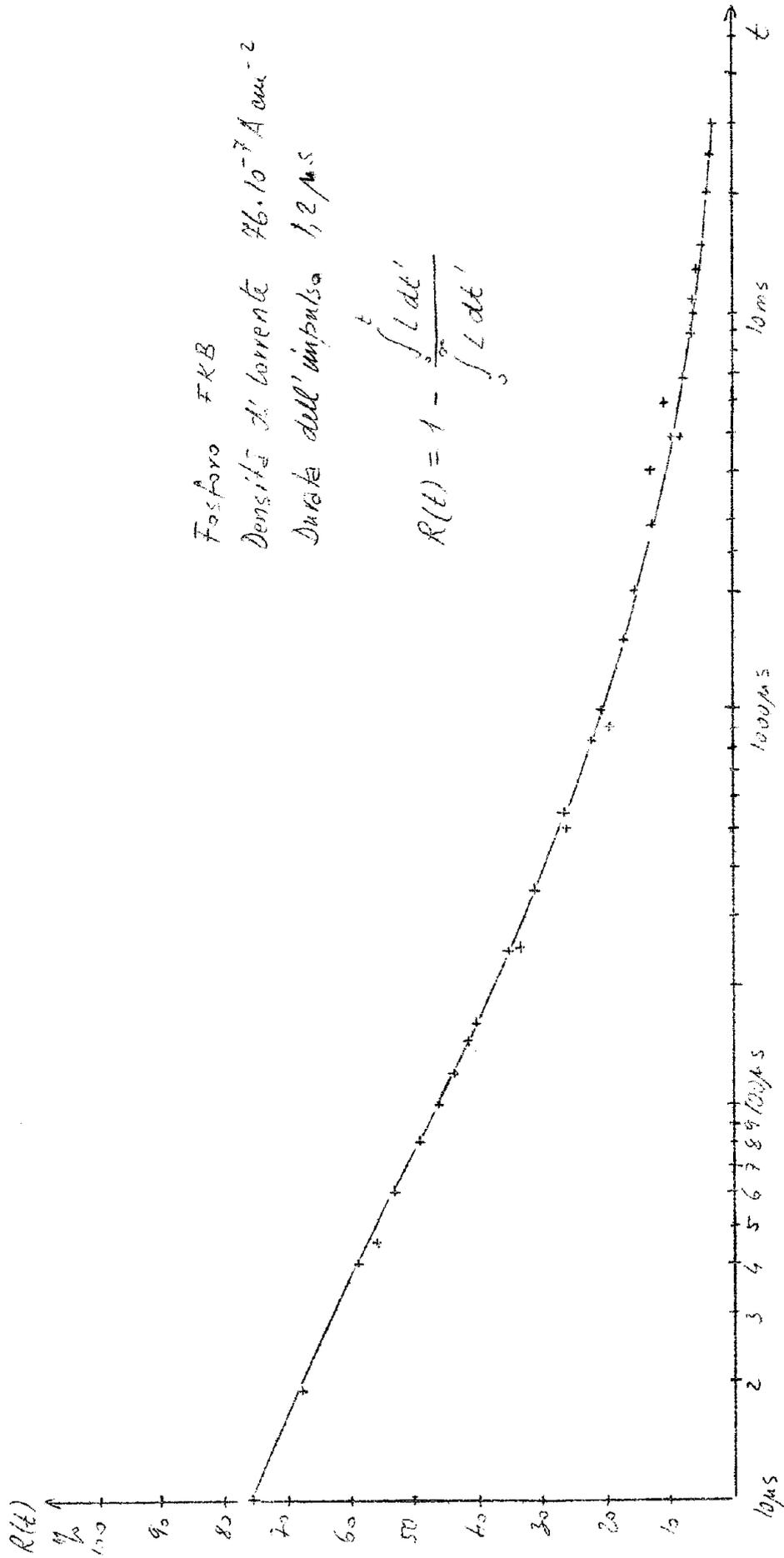


FIG. 18 a)



Fosforo FKB
 Densità di corrente $5,2 \cdot 10^{-7} \text{ A cm}^{-2}$
 Durata dell'impulso $1,2 \mu\text{s}$

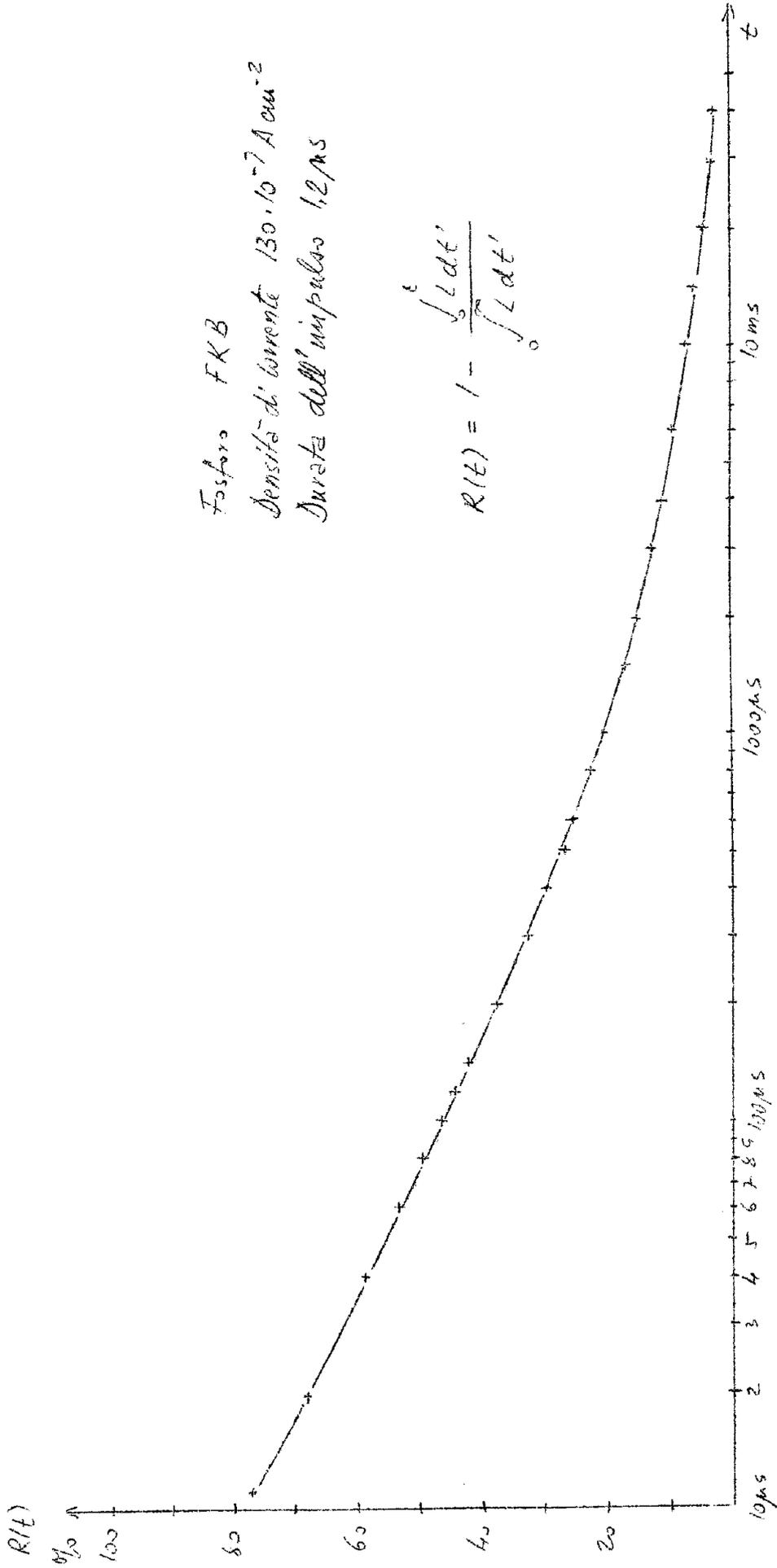
FIG. 18.61



Fosforo FKB
 Densità di corrente $76 \cdot 10^{-3} \text{ A cm}^{-2}$
 Durata dell'impulso $1,2 \mu\text{s}$

$$R(t) = 1 - \frac{\int_0^t L dt'}{\int_0^\infty L dt'}$$

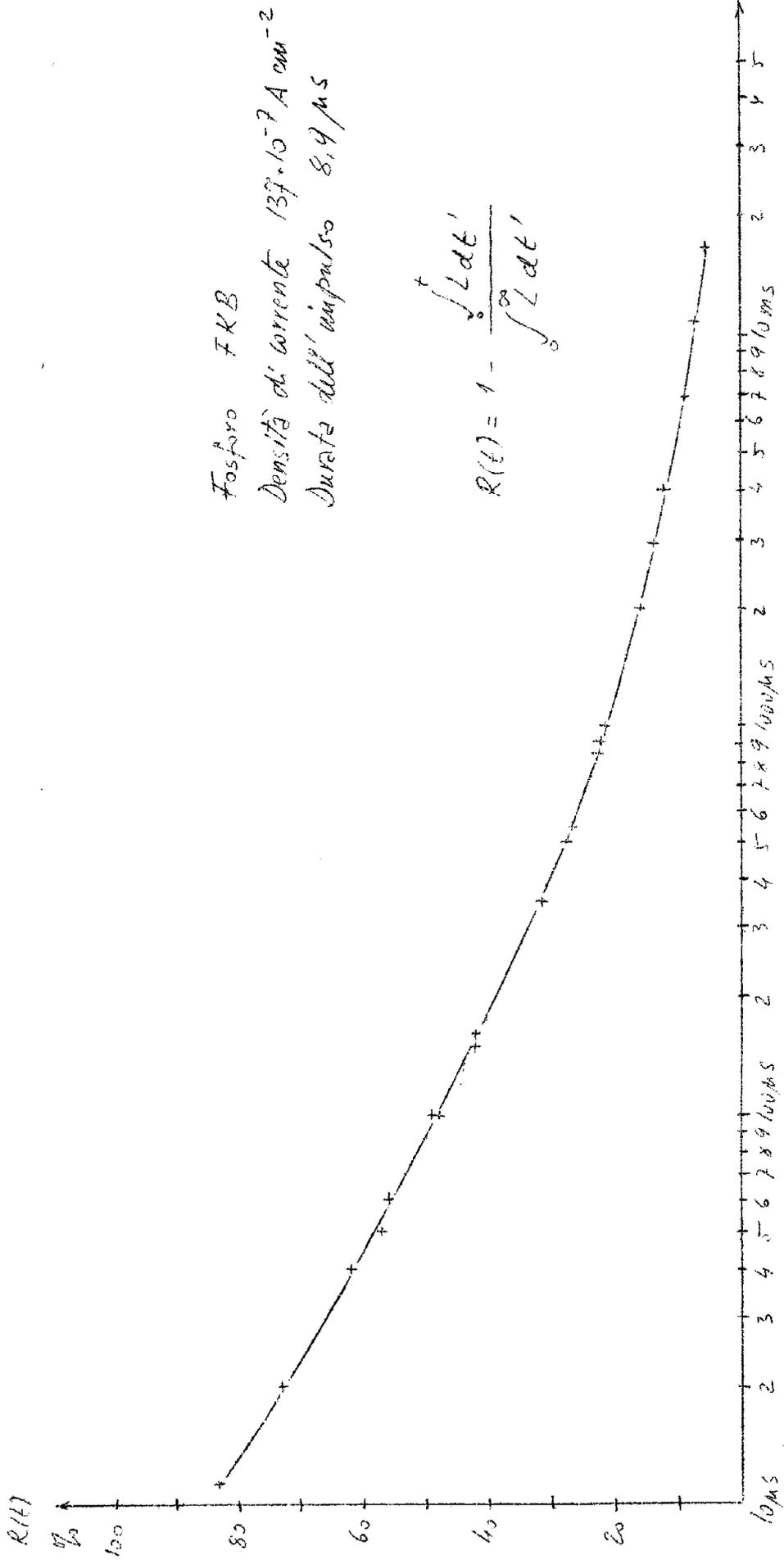
FIG 18c)



Fosforo FKB
 Densità di corrente $130 \cdot 10^{-7} \text{ A cm}^{-2}$
 Durata dell'impulso 1,2 ns

$$R(t) = 1 - \frac{\int_0^t L dt'}{\int_0^\infty L dt'}$$

FIG. 18 d)



Fosforo FKB
 Densità di corrente $139 \cdot 10^{-7} \text{ A cm}^{-2}$
 Durata dell'impulso 8,9 μs

FIG. 18e)

po di impulso. Con tempi di impulso più brevi e l'FKB è il più opportuno.

Le curve possono essere rappresentate fino al tempo di 200 μsec mediante la formula

$$(5) \quad R(t) = \frac{1}{(1 + \alpha t)^{\beta-1}}$$

con $\alpha = 0,15 (\mu\text{s})^{-1}$, $\beta = 1,27$ (vedi sezione 3.2.4). Nella figura 19 è dato $R(t)$ in funzione di $(1 + \alpha t)$ su carta doppio logaritmica. La funzione (5) si mostra come una retta. Più avanti la curva misurata cade più rapidamente e mostra che l'intensità di luce va con una legge come t^{-2} . Per controllo è stata anche disegnata la funzione $L(t)$. Lo andamento è dato dall'equazione 3 con le stesse costanti α e β come $R(t)$ dell'equazione 5. Nella figura 20 è disegnata $L(t)$ in funzione di T . Inoltre la fig. 20 contiene i valori calcolati dalla equazione 3 e altre funzioni (vedi sezioni 3.2.4).

Nei valori calcolati si tenne conto che la fosforescenza successiva non è provocata in tutti i centri di fosforescenza allo stesso tempo ma nei primi già subito dopo l'inizio dell'impulso di corrente. Altrimenti si svolgono i fatti quando l'irraggiamento è così intenso che i singoli centri di fosforescenza non sono più indipendenti l'uno dall'altro (vedi sezione 3.2.4.5).

Si deve ancora provare se la costante di tempo di integrazione con 9,5 secondi era sufficientemente grande. Con una costante di tempo non troppo grande dopo un certo tempo (nel nostro caso dopo 150 msec) il condensatore si scarica su una resistenza in parallelo e per altro la carica che proviene dall'emissione di luce mantiene un certo equilibrio; in tempi successivi la scarica del condensatore prende la prevalenza.

Pertanto la tensione massima del condensatore non è più proporzionale a $\int_0^{\infty} L(t) dt$, ed $R(t)$ non può essere calcolata esattamente. poichè l'intensità di luce dopo lungo tempo è molto piccola all'istante del massimo $R(t)$ può avere ancora un considerevole valore.

Dall'andamento della tensione ai capi del condensatore dopo il valore massimo si può stimare se un simile errore viene introdotto dalla misura. Da 150 fino a 350 msec l'andamento della diminuzione della tensione dovuto alla costante di tempo è di 1,9%. Dalle curve misurate si può ricavare che in questo tempo viene emessa ancora circa 0,2% della luminescenza totale. Pertanto si deve prevedere una diminuzione di 1,7%. Sono stati misurati 1,9-1,8-1,6-1,5%. La distribuzione di questi valori è dentro gli errori della misura oscillografica. Se si assume che al tempo del massimo sia $R(t) = 0,075$, ci si deve aspettare una diminuzione di circa 1,1%. In questo caso l'errore è

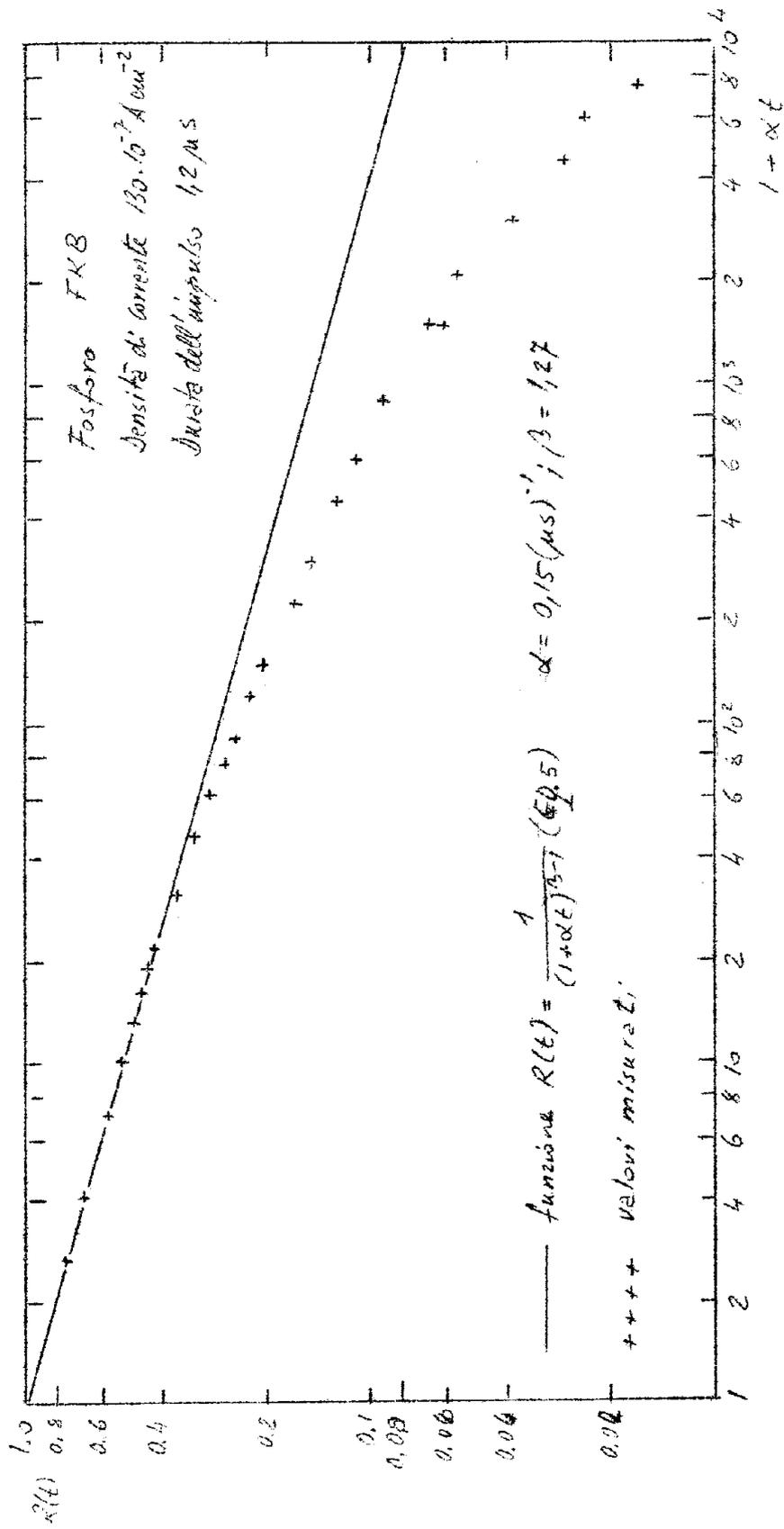


Fig. 19

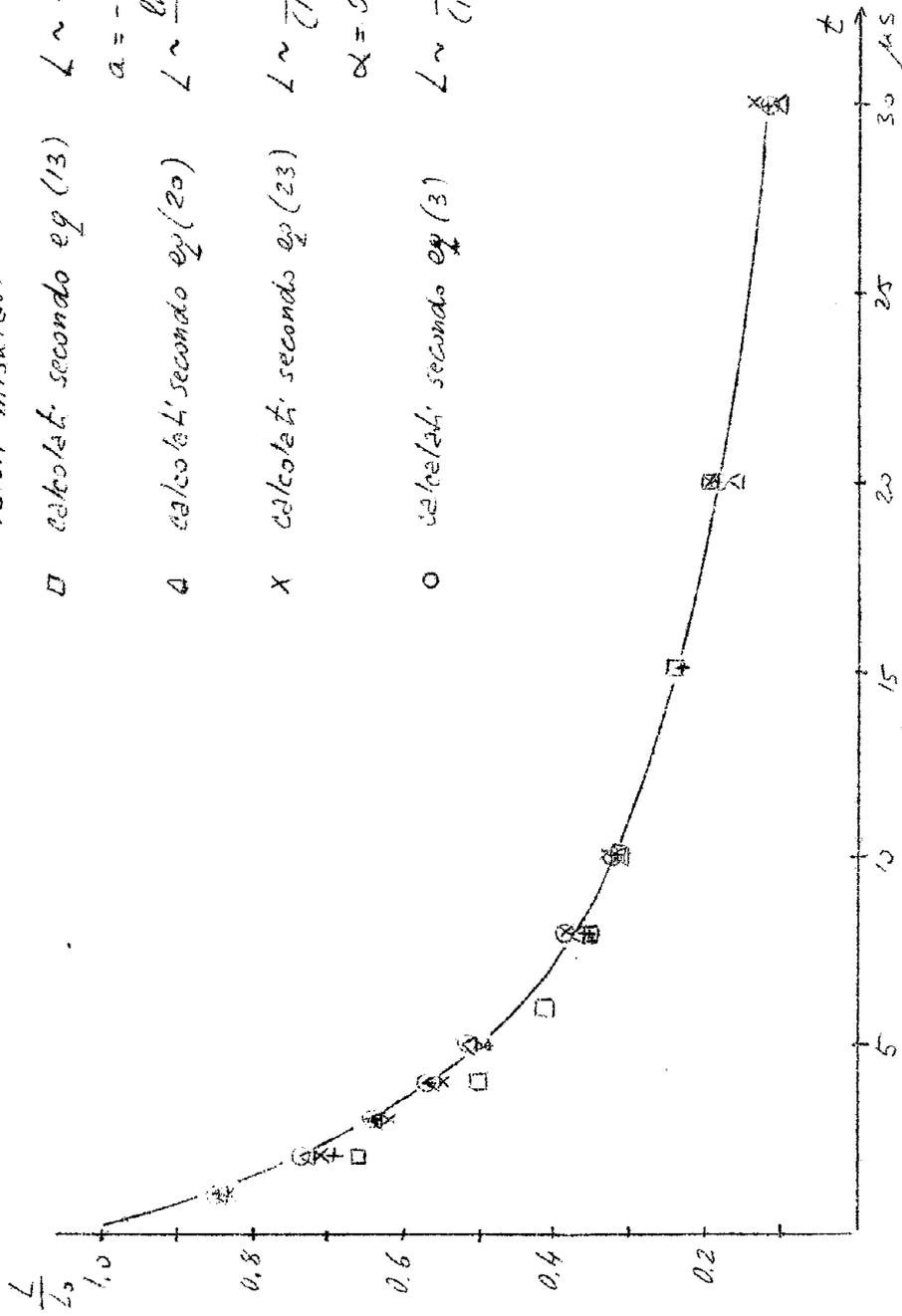


Fig. 20
Luminescenza del ZnS

* Valori misurati:

□ calcolati secondo eq (13) $L \sim \frac{dR}{dt} = \frac{R^2}{aR + b}$; $[A^+] = R/[A_0^+]$

$a = -175 \mu\text{s}$; $b' = 0.00 \mu\text{s}$

△ calcolati secondo eq (20) $L \sim \frac{\ln(1 + \alpha t)}{(\alpha t)^2} - \frac{1}{\alpha t(1 + \alpha t)}$; $\alpha = 0.14 (\text{ms})^{-1}$

× calcolati secondo eq (23) $L \sim \frac{1 - e^{-E/kt}}{(1 + \alpha t)(1 + \alpha t e^{-E/kt})}$

$\alpha = 0.225 (\mu\text{s})^{-1}$; $E = 5.4 kT$

○ calcolati secondo eq (3) $L \sim \frac{1}{(1 + \alpha t)^{\beta}}$; $\alpha = 0.15 (\text{ms})^{-1}$; $\beta = 1.27$

al più dal 2 al 3%.

3) 2.4 - Teoria del fosforo; interpretazione delle misure.

3.2.4.1.

L'andamento trovato sperimentalmente per la fosforescenza si può attualmente interpretare con un ben noto modello del fosforo al quale appartiene anche il solfuro di zinco attivato con argento. Peraltro non può essere questa interpretazione quantitativa ma soltanto qualitativa. Si assume che nel cristallo esistano due specie di centri di deformazione attivatori A o intrappolatori (trapping-level) H con posizioni immediatamente sopra della banda di valenza completamente occupata e, rispettivamente, immediatamente sotto la banda di conduzione (vedi fig. 21).

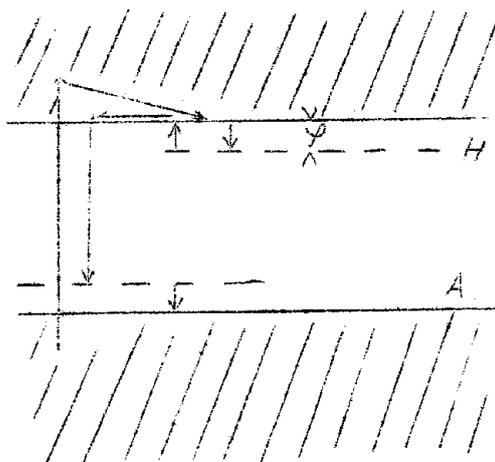


FIG. 21

I primi sono normalmente occupati da un elettrone i secondi sono liberi. Mediante eccitazione con elettroni e raggi gamma gli elettroni già dalla banda di valenza vengono spostati nella banda di conduzione e qui vi si trovano liberi. Mediante urti con i centri del cristallo essi perdono in breve tempo (10^{-12} secondi) una parte della loro energia e pertanto non possono più ricombinarsi per

ragioni di conservazione dell'impulso con la banda di valenza. Essi quindi vengono catturati o da centri neutri (H^X) oppure da atomi attivatori positivi (A^+) mediante emissione di luce. Gli A^+ hanno origine del fatto che nel frattempo i buchi positivi della banda di valenza sono giunti su atomi attivatori neutri (A^X) e si sono ricombinati con l'elettrone facilmente scindibile di questi.

Dai centri H gli elettroni possono essere allontanati soltanto mediante l'acquisizione di energia termica dal reticolo cristallino; nel caso non subiscano alcuna influenza esterna, per esempio irraggiamento infrarosso, pertanto il numero di elettroni per unità di tempo vanno nella banda di conduzione è dato da:

$$\gamma [H^-] e^{-\frac{\psi}{kT}}$$

dove nella parentesi è data la concentrazione e ψ rappresenta la distanza di energia delle H dalla banda di conduzione. γ è una costante.

Se P e Q sono le sezioni d'urto della A^+ e degli H^X e $[H^0]$ la concentrazione delle H dove

$$[H_0] = [H^X] + [H^-]$$

allora la probabilità che un elettrone proveniente dalla banda di conduzione ricombini con un attivatore positivo è dato da

$$(6) \quad W = \frac{k [A^+]}{k [A^+] + \gamma ([H_0] - [H^-])}$$

Se infine N^- è la concentrazione degli elettroni nella banda di conduzione ed N^+ la concentrazione buchi positivi nella banda di valenza e valgono le relazioni

$$(1) \quad \begin{aligned} n^- &\ll [H^-] & n^+ &\ll [A^+] \\ \left| \frac{dn^-}{dt} \right| &\ll \left| \frac{d[H^-]}{dt} \right| & \left| \frac{dn^+}{dt} \right| &\ll \left| \frac{d[A^+]}{dt} \right| \\ [A^+] &\approx [H^-] \end{aligned}$$

allora:

$$(8) \quad L \sim - \frac{d[A^+]}{dt} = \frac{\nu [A^+]}{\nu [A^+] + \rho ([H_2] - [A^+])} [A^+] \gamma e^{-\frac{\psi}{kT}}$$

Nel caso che

$$\nu [A^+] \gg \rho ([H_2] - [A^+])$$

vale

$$(9) \quad \frac{d[A^+]}{dt} = - \gamma [A^+] e^{-\frac{\psi}{kT}}$$

o

$$(10) \quad L = -B \frac{d[A^+]}{dt} = B \frac{[A_0^+]}{T_0} e^{-\frac{t}{T_0}}$$

dove $T_0 = \gamma^{-1} e^{\frac{\psi}{kT}}$, $[A_0^+]$ la concentrazione iniziale degli A^+ e B una costante di proporzionalità.

Se invece $P = Q$ oppure $[A^+]/\rho \ll \rho [H_2]$ (l'ultimo caso è sempre valido dopo un tempo sufficientemente lungo) allora ne segue:

$$(11) \quad \frac{d[A^+]}{dt} = - \frac{\nu \gamma e^{-\frac{\psi}{kT}}}{\rho [H_2]} [A^+]^2 = -c [A^+]^2$$

o

$$(12) \quad L = -B \frac{d[A^+]}{dt} = B \frac{c [A_0^+]^2}{(1+c [A_0^+] t)^2} \quad c = \frac{\nu \gamma e^{-\frac{\psi}{kT}}}{\rho [H_2]}$$

Lo stesso fosforo può quindi, in dipendenza della intensità della eccitazione, emettere l'energia luminosa sia esponenzialmente che iperbolicamente. Dopo un tempo sufficientemente.

In entrambi i casi l'andamento dell'emissione luminosa dipende dalla temperatura. Una differenza importante è: nel caso iperbolico, l'andamento dipende dalla concentrazione iniziale degli A^+ .

3.2.4.2.

La equazione (8) può mettersi nella forma:

$$(13) \quad - \frac{d[A^+]}{dt} = \frac{[A^+]^2}{a[A^+] + b} \quad b = \frac{g[H_0]}{k_8 e^{-P/KT}}$$

$$a = \frac{k_9}{k_8 e^{-P/KT}}$$

La soluzione è:

$$(14) \quad a \ln \frac{[A_0^+]}{[A^+]} + b \left(\frac{1}{[A^+]} - \frac{1}{[A_0^+]} \right) = t$$

dove $[A_0^+]$ ha il significato di una concentrazione iniziale. Secondo la definizione è:

$$R(\tau) = 1 - \frac{\int_0^\tau L dt}{\int_0^\infty L dt} = 1 - \frac{-\int_0^\tau \frac{d[A^+]}{dt} dt}{-\int_0^\infty \frac{d[A^+]}{dt} dt} = \frac{[A^+]}{[A_0^+]}$$

Se si misura $[A^+]$ in unità di $[A_0^+]$, allora è:

$$R = [A^+]$$

e, ancora:

$$(16) \quad a \ln \frac{1}{R} + b' \left(\frac{1}{R} - 1 \right) = t \quad \text{con } b' = \frac{b}{[A_0^+]}$$

Dalla equazione (16) si può calcolare t per un predeterminato valore di $R(t)$ e dalla equazione (13) si può calcolare la funzione $L(t)$. Con $a = -175 \mu\text{sec}$ e $b' = 200 \mu\text{sec}$ si ottengono le curve che coincidono abbastanza bene con quelle misurate fino a un valore di t di circa $150 \mu\text{sec}$ (fino a differenze di $\Delta r/r = 0,07$). Di poi la curva $R(t)$ si allontana verso il basso dalla curva misurata. Probabilmente, esiste ancora una seconda specie di H situate ancora più in basso i cui elettroni, inizialmente poco e più tardi, quando le prime diventano praticamente vuote, in una misura sempre crescente, contribuiscono alla emissione di luce. Dalle equazioni (13a) e (13b) segue:

$$\left(\frac{b' [A_0^+]}{[H_0]} + a \right) \cdot f \cdot e^{-\frac{y}{kT}} = 1$$

poichè deve essere

(con $b' = 200 \mu\text{sec}$, $a = 175 \mu\text{sec}$) il valore

$$\frac{[A_0^+]}{[H_0]} > \frac{125}{200}$$

Secondo l'ipotesi, però, è: $[A_0^+] \approx [H_0^-] < [H_0]$ e pertanto $[A_0^+] \approx [H_0^-]$; ciò vuol dire che $[A_0^+]$ prende in quelle misure il valore più grande possibile.

2.3.4.3.

Bisogna calcolare altre possibilità per spiegare lo andamento della emissione di luce nel tempo. Se si assume, per esempio, che la concentrazione iniziale della A^+ non sia costante nello spazio, ma vada calando nella direzione radiale allontanandoci da un sottile canale di eccitazione, secondo la formula^(x)

$$(17) \quad [A_0^+] = [A_{00}^+] \cdot e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}$$

e che questa concentrazione iniziale vada a regime in meno di 10^{-7} sec e che A^+ non venga modificato dalla diffusione^(o), ma esclusivamente dalla ricombinazione con gli elettroni che provengono dalla banda di conduzione ed infine, se si fa l'ipotesi che il meccanismo della luminescenza vada con l'equazione (12), allora attorno al canale di eccitazione si trova una corona cilindrica di raggio r e di spessore $n \delta r$ che contribuisce alla emissione mediante la frazione:

(x) - La stessa distribuzione deve essere posta anche per gli H^- poichè l'eq. (18) è stata ricavata mettendo (17) in (12). Ma per la (12) era $[A^+] \approx [H^-]$

(o) - Naturalmente possono gli A^+ stessi non diffondere più degli H^- . La diffusione ha luogo mediante buchi positivi sulla banda di valenza e attraverso elettroni nella banda di conduzione.

$$(18) \quad \alpha L = B \frac{c[A_{00}^+]^2 e^{-2\frac{r^2}{r_0^2}}}{(1 + c[A_{00}^+] e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} t)^2} 2\pi r dr$$

Da ciò segue:

$$(19) \quad L = B \cdot c [A_{00}^+]^2 \pi r_0^2 \left(\frac{\ln(1 + c[A_{00}^+] t)}{(c[A_{00}^+] t)^2} - \frac{1}{c[A_{00}^+] t (1 + c[A_{00}^+] t)} \right)$$

Con $c[A_{00}^+] = \alpha$ si ottiene

$$(20) \quad L \approx \frac{\ln(1 + \alpha t)}{(\alpha t)^2} - \frac{1}{\alpha t (1 + \alpha t)}$$

o

$$(21) \quad R(t) = \frac{\ln(1 + \alpha t)}{\alpha t}$$

Per $\alpha = 0,14 \text{ } (\mu\text{sec})^{-1}$ la $L(t)$ è approssimata ragionevolmente bene dalla equazione (20) fig. 20. Per $R(t)$ la coincidenza è già dopo brevi tempi molto cattiva (v. fig. 22). Una spiegazione di ciò può essere la seguente: la concentrazione, ma anche dalla diffusione nella direzione radiale. Piccole concentrazioni degli A^+ significano però più lungo tempo di decadimento. La curva in fig. 22 viene pertanto spostata verso destra. Un'altra spiegazione si ha assumendo che esistano due diversi processi di decadimento con diverse costanti.

$$(22) \quad R(t) = a \frac{\ln(1 + \alpha_1 t)}{\alpha_1 t} + b \frac{\ln(1 + \alpha_2 t)}{\alpha_2 t} \quad a + b = 1$$

e l'andamento misurato con $\alpha_1 = \frac{1}{8} (\mu\text{sec})^{-1}$, $\alpha_2 = \frac{1}{370} (\mu\text{sec})^{-1}$ ed $\alpha = 0,6$ è ragionevolmente approssimata (v. fig. 22).

α_1 ed α_2 potrebbero essere associate a due diverse specie di H con diverse posizioni dei livelli energetici. Poi entra anche in considerazione un termine di diffusione degli elettroni da uno dei due H all'altro per cui i livelli che si trovano più in basso a causa del più piccolo fattore di Boltzman subiscono in generale un arricchimento.

2.3.4.4.

Un'interpretazione completamente differente per spiegare l'andamento sperimentale della emissione di luce è

+ valori misurati.

□ calcolati secondo eq (16) $a \ln R + b' \left(\frac{1}{R} - 1 \right) = t$; $a = -175 (\mu s)$; $b' = 200 (\mu s)$

△ calcolati secondo eq (21) $R = \frac{\ln(1 + \alpha_1 t)}{\alpha_1 t}$; $\alpha_1 = 0,14 (ms)^{-1}$

▽ calcolati secondo eq (22) $R = 0,6 \frac{\ln(1 + \alpha_2 t)}{\alpha_2 t} + 0,4 \frac{\ln(1 + \alpha_2 t)}{\alpha_2 t}$;

$\alpha_1 = \frac{1}{8} (ms)^{-1}$; $\alpha_2 = \frac{1}{320} (ms)^{-1}$

× calcolati secondo eq (24) $R = 1 - \frac{\ln(1 + \alpha t) - \ln(1 + \alpha t e^{-\epsilon/kT})}{\epsilon/kT}$;

$\alpha = 0,225 (ms)^{-1}$; $\epsilon = 5,4 kT$

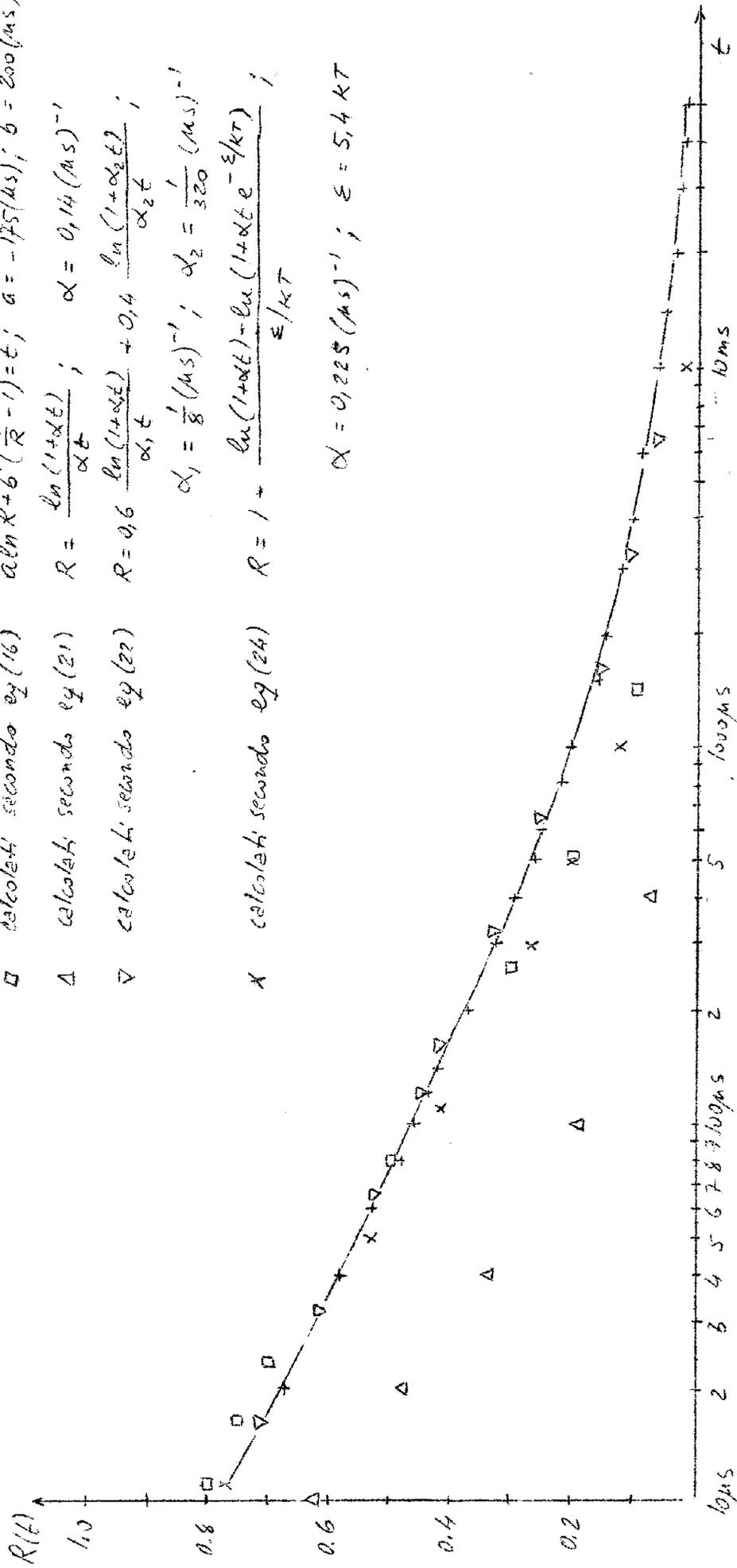


FIG. 22

quella per cui si fa l'ipotesi che gli H siano ugualmente suddivisi in un intervallo da 0 fino a ε al di sotto della banda di conduzione, cioè tutti gli H hanno diversi valori dei numeri quantici e la loro distribuzione è data da $N_{\psi} = \text{cost.}$ dove $N_{\psi} d\psi$ significa il numero di essi nell'intervallo $d\psi$. Nel caso che siano verificate le condizioni per la equazione (12), mediante integrazione di essa su ψ da 0 ad ε si ottiene:

$$(23) \quad L \sim \frac{1 - e^{-\frac{\varepsilon}{kT}}}{(1 + \alpha t)(1 + \alpha e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} t)}$$

e pertanto mediante integrazione su t :

$$(24) \quad R = 1 - \frac{\ln(1 + \alpha t) - \ln(1 + \alpha e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} t)}{\varepsilon/kT}$$

Non si è considerato che gli elettroni diffondono dai più alti H verso i più bassi e viceversa col che lentamente ha luogo un arricchimento nei livelli più bassi. La conseguenza è un allungamento del tempo di fosforescenza con uno scivolamento della curva $R(t)$ verso destra.

$$\alpha = 0,225 (\text{msec})^{-1} \quad \text{e} \quad \varepsilon = 5,4 kT \quad (e^{\frac{\varepsilon}{kT}} = 225)$$

forniscono una buona coincidenza con la misura (v. fig. 20).

È stato misurato a temperatura ambiente un valore di $\varepsilon = 0,14$ eV che era abbastanza plausibile.

3.2.4.5.

Per i fosfori che hanno un decadimento della fosforescenza iperbolico dove aver luogo, secondo la teoria, una dipendenza dell'andamento della fosforescenza dal valore della eccitazione. Mediante l'irraggiamento di un granello di fosforo con quantità di elettroni variabili tra 2 e 750, non è stato osservato alcun apprezzabile cambiamento della fosforescenza. Si deve pertanto supporre che un elettrone può eccitare solo un sottile canale, e decisamente la sezione di esso deve essere più piccola di 10^{-9} cmq. La penetrazione degli elettroni si trova nell'ordine di grandezza di 1 micron. Il volume eccitato è pertanto più piccolo di 10^{-13} cm³.

In questo volume si trovano, con una concentrazione di 10^{-4} , circa 4×10^5 atomi attivatori. Un elettrone di 13 KeV può al massimo, eccitare 4×10^3 A⁺. È pertanto possibile che nel campo 10^{-13} cm³ la concentrazione degli A⁺ sia notevolmente ridotta, come è mostrato nella teoria nella sezione 3.2.4.3.

W. de Groot ha trovato che mediante la eccitazione di solfuro di zinco con raggi X di 50 KeV si ha un volume di eccitazione di circa $6 \times 10^{-15} \text{ cm}^3$.

3.2.4.6.

Come si conclude dalla sezione 3.2.4.2. fino alla sezione 3.2.4.4., il meccanismo della fosforescenza può essere considerato eccezionalmente complicato, poichè secondo quanto visto nella sezione 3.2.4.5., mediante l'urto con elettroni, in relazione alla grossezza dei grani, si hanno soltanto piccoli centri di fosforescenza, è anche molto probabile che la concentrazione iniziale degli A^+ e degli H^- nello spazio non sia costante. Naturalmente, non è necessario che essa abbia la forma di una distribuzione di Gauss. Con l'ipotesi di due diversi processi sovrapposti si ha una buona coincidenza fra la teoria e l'esperienza. Naturalmente questa non è alcuna dimostrazione della correttezza della teoria, poichè nell'un caso si hanno tre diversi parametri a disposizione, e nell'altro la teoria elementare con l'equazione (8), e anche l'ipotesi di una uguale distribuzione di H sulla banda di energia con un meccanismo di reazione bimolecolare (equazione 12), conduce ad una coincidenza ragionevole tra la teoria e l'esperienza.

Probabilmente, tutte le possibilità delle quali qui si è discusso giocano un certo ruolo insieme alla diffusione sia in direzione spaziale sia nello spostamento tra livelli a diverse quote di energia.

L'esatto meccanismo della fosforescenza non deve trovare spiegazioni nel quadro di questo lavoro. Pertanto potrebbe anche essere investigati altri metodi (p.es. misura con diverse temperature e fosforescenza nell'infrarosso, eccitazione con ultravioletti, ecc.).

3) 3 - Dipendenza della temperatura.

Nella sezione 12 è stato accennato che lo schermo fosforescente deve essere riscaldato a 480°C fino a 5 V. La difficoltà che ne consegue per lo strato di alluminio è stata considerata nel paragrafo 24. Rimane da vedere se le proprietà del fosforo vengono cambiate da questo procedimento.

In alcuni casi è stato osservato mediante bombardamento elettronico degli schermi portati a temperatura di 480°C che si presentavano alcune superfici che davano una fosforescenza verde. Non possiamo dire quanto la intensità spettrale si sia relativamente piccola e ciò che si è osservato è dovuto alla sensibilità degli occhi umani per questo particolare colore.

Non è stata osservata alcuna diminuzione della quantità di luce. Nella fig. 23 sono mostrate le misure eseguite

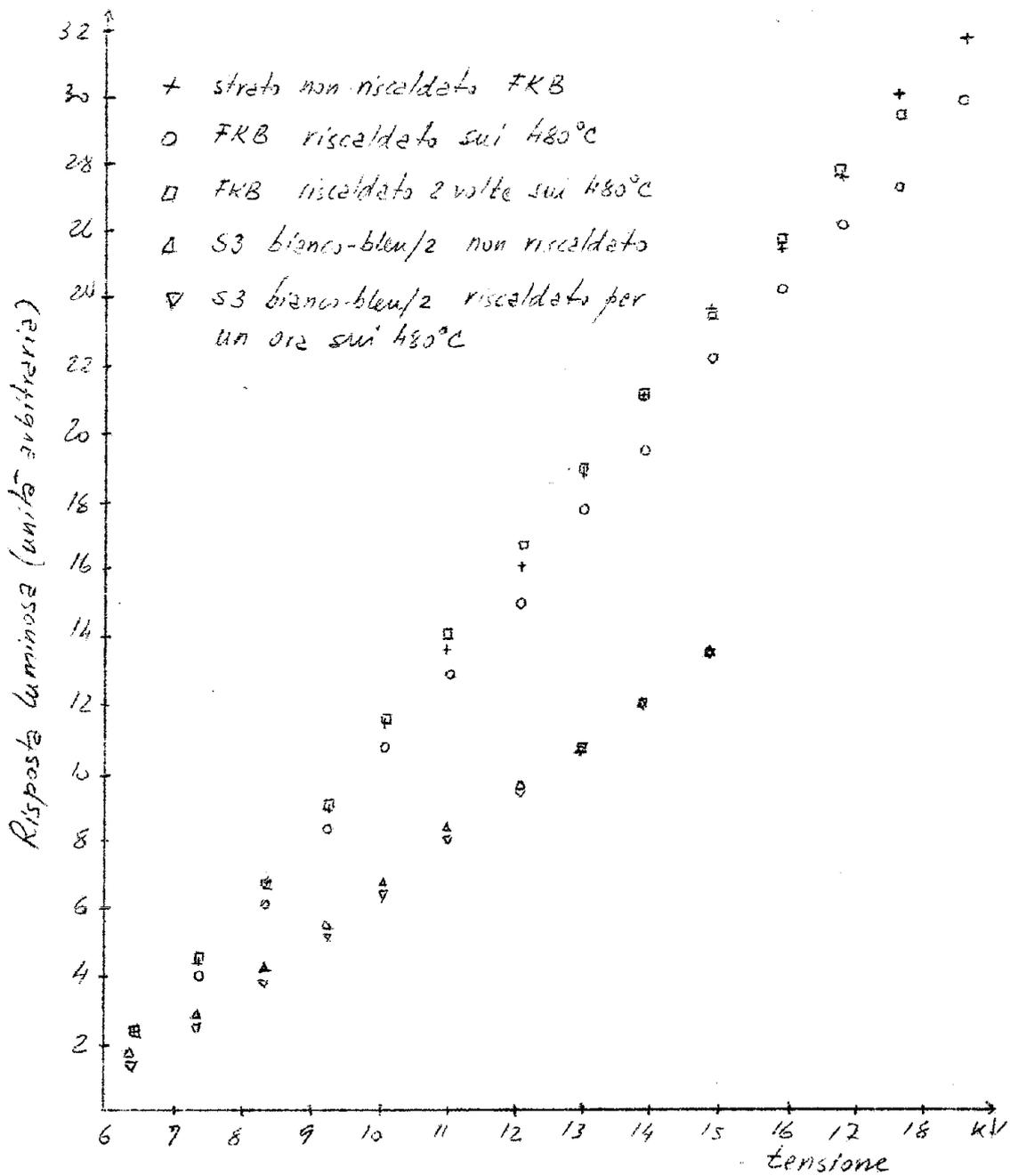


FIG. 23
 stabilità dei fosfori al calore

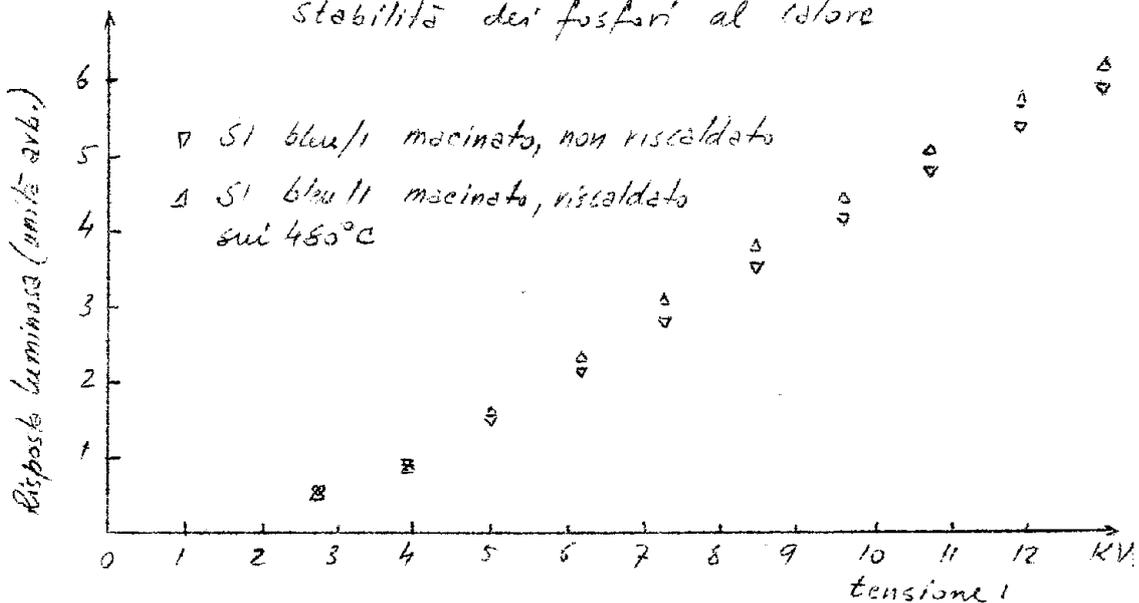


FIG. 24
 Il fosforo macinato non perde nel riscaldamento sui 480°C il suo rendimento. -

te su uno schermo FKB e uno schermo S3 bianco-blu/2 prima e dopo il riscaldamento a 480°C. E' contro la diminuzione della efficienza dello schermo anche un confronto delle misure della fig. 12 (che sono state fatte dopo il riscaldamento a 480°C) con quelle della fig. 10 (che sono state fatte su fosfori FKB non riscaldati).

Anche il processo di decadimento della fosforescenza del tempo non sembra essere cambiato. Una differenza tra schermi riscaldati e non riscaldati per la funzione $R(t)$ non è stato possibile osservarla.

3) 4 - Grandezza dei grani.

La grandezza dei grani è data dal fornitore. Sembra che nel solfuro di zinco man mano che i grani diventano più piccoli anche la efficienza si riduca. Un esempio è dato qui mediante due fosfori provati il K1 blu/1 e S1 blu/1, che secondo i dati del fornitore sono diversi solo per le dimensioni dei grani.

Rimane da vedere se è possibile meccanicamente ridurre le dimensioni dei grani senza variarne la efficienza. Col fosforo K1 blu/2 la ricerca è stata effettuata. In una mola con recipiente di agata e sfere di agata è stato molato questo fosforo per 20 ore. Si è ottenuta una riduzione delle dimensioni dei grani di circa il 25%.

Le misure fatte con questo fosforo insieme a quelle fatte sullo stesso fosforo non molato sono date nella fig. 25a. Gli schermi non erano né alluminati né resi conduttori. Si vede che il fosforo molato è peggiore del fosforo originale. Dalla curva di quest'ultimo si osserva che a circa 13 KV si ha una piegatura che si deve interpretare come un punto nel quale il coefficiente di emissione secondaria diviene inferiore a 1. Nell'altra curva tale piegatura non si ha. Ciò significa che il fosforo molato ha in tutta la misura un coefficiente di emissione secondaria costantemente inferiore o superiore ad 1. Lo stesso effetto lo si è avuto con uno schermo con fosforo S1 blu/1 molato (v. fig. 25b). Si pensa a ulteriori misure in questo senso.

Non si è osservata alcuna variazione della efficienza dopo il riscaldamento a 480° di uno schermo a grani molati tipo S1 blu/1 (v. fig. 24).

4) Conclusioni.

E' stato indicato un processo per la formazione di schermi fluorescenti per un intensificatore di immagine a 5 stadi e sono state indicate le misure fatte su una serie di schermi con diversi fosfori.

Diversi fosfori sono stati provati. Il fattore di guadagno è stato misurato in funzione della tensione di accelerazione degli elettroni. Con un fosforo FKB (solfuro

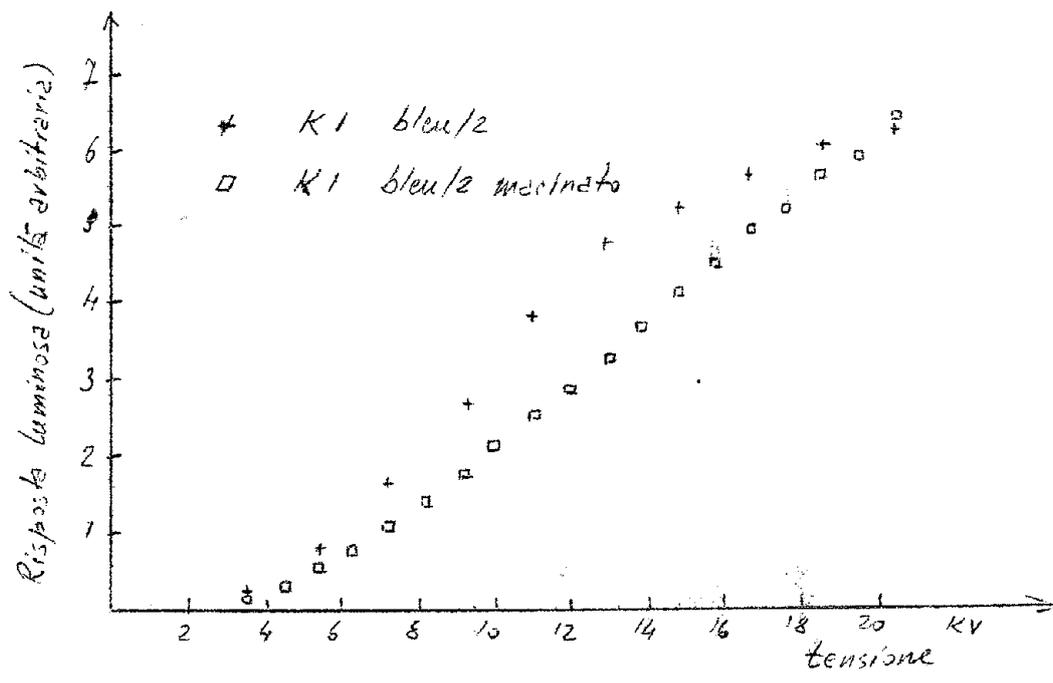


FIG. 25 a
 Minore produzione di luce con fosforo macinato

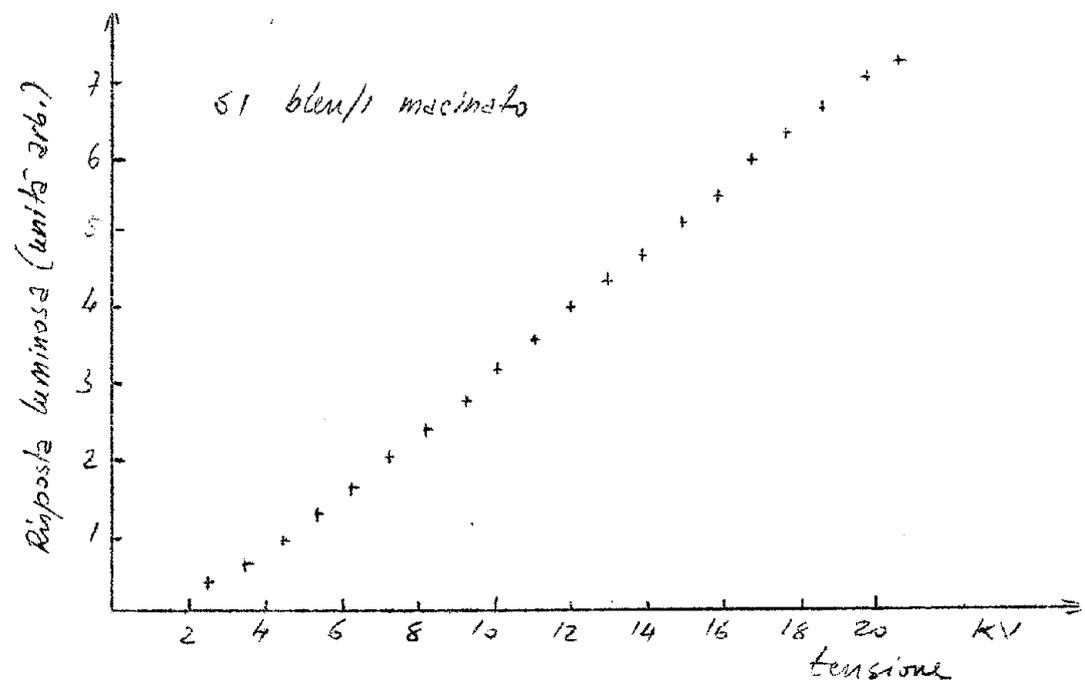


FIG. 25 b
 Con fosforo macinato il coefficiente di emissione secondarie è nel campo fino a 20 KV > 1 o < 1 . -

zinco/ argento) anche con cattivi fotocatodi si ha un fattore di guadagno di circa 10 con tensione di accelerazione tra 11 e 14 KV. Con 20 KV ci si può aspettare un fattore di guadagno di circa 40. In seguito a riscaldamento a 480°C non è stato osservato nessun peggioramento della efficienza dei fosfori. La fosforescenza del fosforo SKB è stata provata e si è trovato che dopo 100 μ sec il 50% della luce accumulata viene irraggiata. Con urto di 2 fino a 750 elettroni per grano di fosforo non si è osservato nessun apprezzabile cambiamento della fosforescenza.

Appendice

Produzione della soluzione di cellulosa

Si sciolgono 6 grammi di nitrocellulosa E 730 in 50 cm³ di Butylacetato, indi si aggiungono 3 cm³ di Etilalcol e 2,5 cm³ di Tributillfosfato. Si mescola quindi bene la soluzione e la si comprime successivamente con una pressione di circa Kp/cm^2 per ottenerne una purificazione attraverso una rete filtrante con dimensione dei fori G4.

Produzione della pellicola di cellulosa

L'ultimo schermo luminescente viene ottenuto per sedimentazione su di un 'piatto di vetro' come in fig. A causa della formazione dello strato di cellulosa è necessario che anche il bordo rialzato del piatto sia coperto con acqua. Circa 15 minuti dopo che lo strato di cellulosa si è depositato si deve eliminare l'acqua aspirandola dall'interno in tal modo la pellicola di cellulosa si deposita sopra il bordo. Attraverso un piccolo buco nella foglia viene internamente aspirata, fino a che questa non si è abbassata sotto allo strato di materiale luminescente. Ora si comprime la pellicola nell'foss laterali attraverso un anello di forma cilindrica fatto di sottile lamierino di Al e si aspira l'acqua che era rimasta, però fra materiale luminescente e pellicola di cellulosa si trova ancora acqua. In tal modo la foglia di cellulosa si può ancora consolidare prima che essa si depositi sopra ai granuli di materiale luminescente. Si pone quindi lo schermo luminescente per alcuni giorni nell'essiccatore. L'anello di alluminio provvede a che la pellicola nell'asciugarsi non si tenda e si possa quindi levare dallo strato luminescente. Prima della vaporizzazione dell'alluminio lo schermo luminescente così come la foglia di vetro vengono riscaldati brevemente sui 100°C e raffreddati lentamente. A questo punto del processo sono stati fatti tentativi di riempire con acqua il piatto di vetro e di pro-

durre sopra lo strato di cellulosa ma gli strati di alluminio successivamente ottenuti per vaporizzazione sono risultati di pessima qualità. Evidentemente procedendo in tal modo la pellicola si deposita troppo attorno ai granuli di materiale luminescente e i fianchi ripidi non si vaporizzano affatto o per lo meno troppo poco. Probabilmente la foglia è attratta per azione di forze elettrostatiche dai granuli di materiale luminescente. Questo può accadere solo molte ore dopo la produzione poichè prima deve evaporare l'acqua fra materiale luminescente e foglia di cellulosa. La foglia risulta tuttavia ancora troppo poco elastica e quindi si rapprende dall'esterno. Questo si ovvia adottando il procedimento sopra descritto. Per l'azione contemporanea di forze elettrostatiche è valida la seguente osservazione: durante l'essiccamento della pellicola di cellulosa su foglie di vetro, che nel frattempo si appoggiano ancora sopra a piatti di alluminio traforati viene riprodotta la struttura della base nella pellicola di cellulosa. La susseguente vaporizzazione dell'alluminio produce nei punti in cui il piatto di alluminio ha buchi uno strato spesso, negli altri punti uno strato di cattiva qualità.

Vaporizzazione degli anelli di contatto di alluminio

Gli anelli di contatto ottenuti per vaporizzazione devono essere particolarmente resistenti poichè la foglia di vetro deve essere, ancora una volta, pulita, immediatamente prima della sedimentazione dello strato di fosforo, con acido di cromo-solfo e bagnata per un certo tempo. Per questo motivo strati di alluminio ottenuti per vaporizzazione in vuoto spinto, senza speciali precauzioni, non danno sufficienti garanzie. Le superficie da vaporizzare vengono quindi riscaldate, prima della vaporizzazione nel vuoto spinto, sui 300°C all'incirca. A questa temperatura sparisce lo strato monomolecolare d'acqua che si trova su ogni superficie. La temperatura è controllata con un termoelemento. La foglia di vetro viene invece riscaldata da un soffio di aria passante attraverso una griglia di riscaldamento posta alla distanza di ~ 1 cm.

Un cilindro metallico protegge la parete di vetro del recipiente dalle radiazioni infrarosse emesse dalla (rovente) griglia di riscaldamento.

Riproducibilità degli spessori degli strati.

L'alluminio viene fatto evaporare quantitativamente da un filo di wolframio; in questa operazione l'alluminio è appeso come una goccia nel punto più basso del filo. Uno studio sullo spessore dello strato ottenuto per vaporizzazione alla distanza di 11 cm in verticale sul filo

di wolframio ha mostrato come la vaporizzazione non abbia luogo con simmetria radiale: si è ottenuto invece in una serie di misure, per una quantità fatta vaporizzare di $25(50) \text{ mm}^3$, uno spessore medio dello strato di $116(210) \mu\text{m}$ con uno scarto medio del valore medio di $4,4(4,8)\%$, mentre una vaporizzazione simmetrica radialmente darebbe $165(330)$.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati di 11 vaporizzazioni sia di una quantità 25 mm^3 di Al che 50 mm^3 di Al. Da esse si ricava che lo scarto medio della vaporizzazione singola aumenta al 15% rispettivamente 16%. Gli scarti massimi dal valore medio sono del 29 e 31% rispettivamente.

<u>25mm³</u>			<u>50mm³</u>		
Spess.dello strato d	v	v ²	Spess.dello str.d	v	v ²
μm	μm	$(\mu\text{m})^2$	μm	μm	$(\mu\text{m})^2$
120	-4	16	185	+25	625
115	+1	1	240	-30	900
120	-4	16	240	-30	900
120	-4	16	275	-65	4225
120	-4	16	275	+35	1225
95	+21	441	220	-10	100
120	-4	16	160	+50	2500
150	-34	1156	205	+5	25
115	+1	1	220	-10	100
85	-31	961	205	+5	25
120	+4	16	190	+20	400
<hr/>			<hr/>		
d _m =	116	v _v =2736	d _m =	210	v _v =1025

Gli spessori riportati nelle tabelle sono stati ottenuti da misure della resistenza elettrica: l'errore statistico che in tal modo si commette è circa del 5%. Ad esso si aggiungono ancora errori sistematici che sono condizionati dalla precisione di misura degli strumenti elettrici (ciascuno $\rightarrow 1\%$) e dalla esattezza della curva di correzione in fig. 6 (circa 12%). Il fatto che gli spessori degli strati non riescano molto uniformi si può spiegare pensando che i fili di wolframio usati non abbiano tutti la stessa conformazione. Va inoltre accennato che

(°) - I concetti di 'scarto medio del valore medio', e 'scarto medio della vaporizzazione singola' sono analoghi ai concetti di 'errore medio del risultato' ed 'errore medio della singola misura' che si incontrano nella teoria degli errori e devono essere calcolati come questa insegna.

la proporzionalità fra spessore medio dello strato e quantità vaporizzata nella precedente tabella è una prova della esattezza della curva di correzione riportata in fig.6.

Ringraziamo il Prof. W. Paul per la possibilità offertaci di eseguire questo lavoro nel suo Istituto.

Bibliografia

- (1) International Conference on High-Energy - Accelerators and Instrumentation, CERN 1959.
- (2) A. Brill and H.A. Klasens - Intrinsic Efficiencies of Phosphors under Cathode-Ray Excitation - Philips Res. Rep. 7, 401 (1952)
- (3) A. Brill and H.A. Klasens: New Phosphors for Flying-Spot. Cathode-Ray Tubes - Philips Res. Rep. (1952)
- (4) Friedrich Eckart: Elektronenoptische Bildwandler und Röntgenbildverstärker - J.A. Barth, Leipzig, 1956.
- (5) F. De Boer und H. Emmens: Sedimentierung von Leuchtschirmen in Kathodenstrahlrohren - Philips Technische Rundschau, 16 Jahrgang, Nr. 9, S. 272 (Marz 1955)
- (6) F. Stockmann: Zur Physik der Kristallphosphore - Die Naturwissenschaften, 1952, S. 226/246.
- (7) D. Smidt: Das Abklingen der Lumineszenz silberaktivierter ZnS-Phosphore nach Anregung durch einzelne α -Teilchen und Elektronen - Ann Physik 15, 325 (1955)
- (8) Garlick G.F.J.: Luminescence - Handbuch der Physik XXVI (Licht und Materie II) - Springer, 1958.

I N D I C E

1) INTRODUZIONE	
Determinazione del problema	1
Considerazioni sugli schermi fluorescenti	3
Ricerche sulle sostanze fluorescenti	5
2) FORMAZIONE DELLO SCHERMO FOSFORESCENTE	
Generalità	6
Sedimentazione del materiale fluorescente	7
La foglia di cellulosa	8
Evaporazione dell'alluminio	10
3) PROPRIETA' DEL FOSFORO	
Introduzione	12
Il dispositivo di misura	13
Discussione degli errori	15
Misure su schermi depositi su superficie di vetro mediante diversi fosfori	17
Misure su schermi FKB su foglie di vetro	19
Influsso della concentrazione del silicato e del tempo di sedimentazione	19
Andamento della emissione di luce nel tempo	20
Il dispositivo sperimentale	22
Misure	23
Teoria del fosforo; interpretazione delle misure ..	25
Dipendenza della temperatura	32
Grandezza dei grani	33
4) CONCLUSIONI	33
APPENDICE	
Produzione della soluzione di cellulosa	34
Produzione della pellicola di cellulosa	34
Vaporizzazione degli anelli di contatto di Al	35
Riproducibilità degli spessori degli strati	35
BIBLIOGRAFIA	37