

COME VEDERE LA LUCE : ESPERIENZE CON FOTORIVELATORI

(Luigi Togliani Liceo Scientifico "Belfiore" Mantova 11/3/98)

1. Fotorivelatori

Nei processi elettro-ottici distinguiamo tra

FOTOEMETTITORE (convertitore elettro- ottico)	MEZZO DI PROPAGAZIONE	FOTORIVELATORE (convertitore ottico- elettricc)
---	--------------------------	---

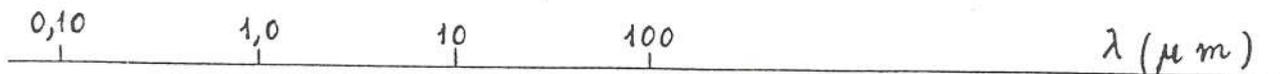
Un fotorivelatore può essere:

- a singolo elemento (o a singolo punto), se il segnale di uscita è proporzionale alla potenza raccolta dall'area sensibile;
- ad immagine, se nell'area sensibile è individuabile una singola o doppia molteplicità di rivelatori, uno per ogni pixel (elemento di immagine); es. i tubi per ripresa televisiva.

F O T O R I V E L A T O R I

	A SINGOLO ELEMENTO	AD IMMAGINE
- a effetto fotoelettrico esterno (o a fotoemissione)	<ul style="list-style-type: none"> • fotodiodi a vuoto • fotodiodi a gas • celle fotoelettriche • fotomoltiplicatori 	<ul style="list-style-type: none"> • tubi da ripresa • intensificatori
- a effetto fotoelettrico interno	<ul style="list-style-type: none"> • fotodiodi e semiconduttore • fototransistori • fotoresistenze 	<ul style="list-style-type: none"> • matrici CCD
o fotovoltaico	<ul style="list-style-type: none"> • celle fotovoltaiche 	<ul style="list-style-type: none"> • vidicon
- termici	<ul style="list-style-type: none"> • termocoppie (fotopile) • termistori • piroelettrici 	<ul style="list-style-type: none"> • vidicon IR
- ad interazione debole	<ul style="list-style-type: none"> • photon drag • cella di Golay • a eff. fotoelettromagn. 	

CAMPI SPETTRALI DI IMPIEGO



----- a effetto fotoelettrico esterno
 ----- a effetto fotoelettrico interno
 ----- termici

2. Effetto fotoelettrico esterno

2.1. Generalità.

Si parla di effetto fotoelettrico esterno quando un fotone (o quanto di energia) viene assorbito dal materiale con la conseguente produzione di una coppia elettrone-lacuna, nel caso che l'elettrone fotogenerato venga emesso e sia disponibile nel vuoto.

Storicamente l'effetto fotoelettrico fu osservato da Heinrich Hertz nel 1887, quando notò che, se un fascio luminoso di lunghezza d'onda molto piccola colpisce una superficie metallica, questa può emettere cariche elettriche. Successivamente W. Hallwachs (1888-89) e P. Lenard (1899-1900) ne trovarono ulteriori conferme sperimentali.

2.1.1. Esperienza qualitativa sull'effetto fotoelettrico esterno.

Si pone una piastra di zinco al posto del pomello di un elettroscopio carico negativamente. Si invia sulla piastra un fascio di luce prodotto da : una lampada ad incandescenza, un fascio laser, una lampada a raggi ultravioletti. Si nota che solo in quest'ultimo caso l'elettroscopio si scarica rapidamente.

Si ripete l'esperienza, partendo dall'elettroscopio carico positivamente : ora in nessun caso si osserva una scarica rapida.



2.2. Analisi quantitativa dell'effetto fotoelettrico.

Nel 1905 Albert Einstein pubblicò sugli *Annalen der Physik* la memoria "Emissione e trasformazione della luce, da un punto di vista euristico", che gli valse il Nobel nel '21. In questo breve saggio Einstein afferma:

"Mi sembra che le osservazioni compiutesi sulla radiazione di corpo nero, la fotoluminescenza, l'emissione di raggi catodici tramite luce ultravioletta ed altri gruppi di fenomeni relativi all'emissione ovvero alla trasformazione della luce, risultino molto più comprensibili se vengono considerate in base all'ipotesi che l'energia sia distribuita nello spazio in modo discontinuo."

E poi (le formule sono scritte con l'uso dell'attuale formalismo):

"Un elettrone carico di energia cinetica all'interno del corpo perderà una parte della sua energia cinetica quando raggiungerà la superficie. Inoltre va supposto che ogni elettrone, nell'abbandonare il corpo, debba effettuare un lavoro L (che è caratteristico della sostanza del corpo considerato).[...]

L'energia cinetica di tali elettroni è:

$$E_c = h\nu - L = e V_a$$

(V_a è il potenziale di arresto, L il lavoro di estrazione).

"Se la formula è corretta, V_a deve essere riportato su assi cartesiani come funzione della frequenza della luce eccitatrice; il grafico è una retta, la cui inclinazione è indipendente dalla natura della sostanza analizzata.

La nostra concezione non è in contraddizione con quanto afferma Lenard sulle proprietà dell'effetto fotoelettrico da lui osservate. Se, indipendentemente da tutti gli altri, ogni quanto di energia della luce eccitatrice trasmette la sua energia a elettroni, la velocità di distribuzione degli elettroni, cioè la qualità della radiazione catodica emessa, sarà indipendente dall'intensità della luce emettente; d'altra parte il numero degli elettroni che lasciano il corpo sarà proporzionale, a parità di altre condizioni, all'intensità della luce emettente."

L'interpretazione einsteiniana dell'effetto fotoelettrico trovò successive conferme nei lavori di O.W. Richardson-C.T. Compton del 1912 e nella determinazione della costante di Planck fatta da R.A. Millikan nel 1916.

La teoria fotonica di Einstein spiegò tre aspetti incomprensibili con la classica teoria ondulatoria. Ciò è riassunto come segue.

TEORIA ONDULATORIA CLASSICA

L'energia cin. dei fotoelettroni aumenta al crescere dell'intensità della luce incidente (FALSO)

L'effetto fotoelettrico è possibile per ogni frequenza ν della luce incidente (FALSO)

Ogni elettrone può ricevere solo una piccola porzione del fronte incidente, quindi l'emissione richiede tempi lunghi (FALSO)

TEORIA FOTONICA EINSTEINIANA

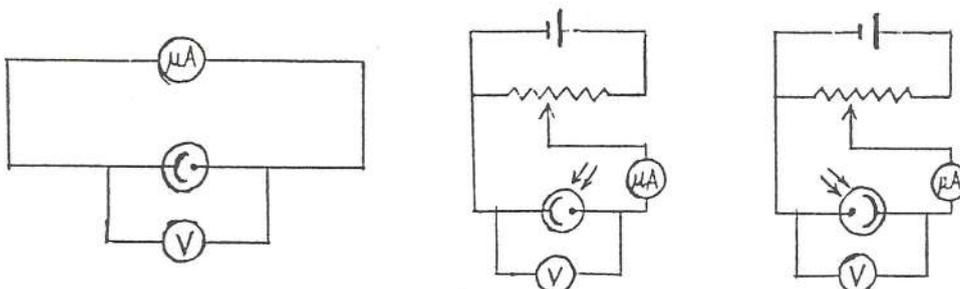
L'intensità luminosa incidente è proporzionale al numero dei fotoelettroni, ma non cambia l'energia $h\nu$ dei fotoni, né l'en. cin. dei fotoelettroni

L'eff. fot. avviene solo per frequenze $\nu \geq \nu_0$, ove ν_0 dipende dalla natura della superficie emittente

L'emissione è istantanea perché l'energia è fornita per quantità discrete concentrate

2.2.1. Studio sperimentale di una fotocella.

Costruito il circuito senza alimentatore come in figura, si nota che, al variare dell'illuminamento della fotocella, cambia l'intensità di corrente e la d.d.p. ai capi della fotocella. Inserita una sorgente contropolarizzata e poi polarizzata rispetto alla fotocella, si fanno letture (V, i) e si trova la caratteristica della cella per una data luminosità. Si ricava poi il potenziale di arresto col quale la fotocorrente si annulla.



3. Effetto fotoelettrico interno

Si parla di effetto fotoelettrico interno (o di fotoconduzione o di fotoconduttività in senso stretto) quando un fotone, assorbito dal materiale, determina la produzione di una coppia elettrone-lacuna disponibile solo per la circolazione entro il materiale e nel circuito esterno: la radiazione incidente eccita gli elettroni da stati legati a stati liberi, capaci di contribuire alla conduzione, senza però acquistare energia sufficiente per uscire dal materiale. Per avere corrente occorre collegare l'elemento fotosensibile ad un generatore di tensione.

I materiali ideali per l'effetto fotoelettrico esterno sono i semiconduttori o gli isolanti.

Perché avvenga la produzione elettrone-lacuna occorre che si realizzi la condizione

$$h\nu \geq E \quad ;$$

la lunghezza d'onda di soglia sarà :

$$\lambda_0 = hc / E$$

Generalmente $E = E_g$ (intervallo di energia proibito o gap), quando la banda di conduzione e la banda di valenza sono proprie del semiconduttore (rivelatore intrinseco). I requisiti per la fotoconduzione sono meno impegnativi di quelli richiesti per la fotoemissione. Occorre solo assicurare che si crei un campo sufficiente per separare le cariche fotogenerate, ad esempio utilizzando quello fornito da una giunzione pn (fotodiodo o foto transistor) oppure applicando una f.e.m. esterna (fotoresistore). Per i rivelatori a fotoemissione si usa una varietà notevole di materiali: semplici (Si, Ge, Se,...), composti binari (GaAs, InSb, PbS, PbSe,...), composti ternari (GaAlAs, InGaP, HgCdTe, PbSnTe,...), composti quaternari (InGaAsP,...). I salti di energia proibita E_g vanno da meno di 0,1 eV a qualche eV; pertanto il campo spettrale della lunghezza d'onda di soglia va dal lontano infrarosso al vicino ultravioletto.

3.1. Fotodiodi a giunzione

La giunzione pn viene colpita dalla radiazione sul lato p, che è sottile in modo che pochi fotoni siano assorbiti nella regione neutra (non svuotata). Le coppie di portatori di carica (elettroni e lacune) generate a seguito dell'assorbimento di fotoni con $h\nu \geq E_g$, hanno una concentrazione che decresce esponenzialmente con la profondità z del materiale, secondo la legge:

$$P = P_0 \exp(-az).$$

In un buon materiale semiconduttore, nell'intervallo di energia proibita, tutti i portatori utili attraversano la giunzione senza ricombinarsi, ovvero senza essere persi.

Nei fotodiodi np valgono le stesse considerazioni, scambiando i ruoli di elettrone e lacuna. Pur equivalenti, i due tipi di fotodiodo hanno diversa rapidità di risposta perché la mobilità degli elettroni è superiore a quella delle lacune: questo privilegia i fotodiodi pn rispetto agli np.

La sensibilità spettrale $\sigma = i_f / P$, definita come rapporto tra l'intensità di corrente fotogenerata e la potenza radiante incidente, è variabile a seconda del materiale usato. Sia nei fotodiodi al Si che in quelli al GaAs l'efficienza è massima nel vicino infrarosso a circa 800-900 nm, ma è buona in tutto il visibile, con una maggiore ampiezza spettrale nel silicio. Quest'ultimo materiale è quello più adoperato nella produzione industriale di fotodiodi. I fotodiodi al Ge (campo spettrale 1000-1800 nm) sono usati nelle telecomunicazioni in fibra ottica.

La corrente i che attraversa il fotodiodo ad una certa tensione V è data dalla somma tra la corrente dovuta alla giunzione pn (data dalla legge di Shockley) e dalla corrente i_f fotogenerata nella regione di svuotamento. Pertanto risulta:

$$i = i_s \cdot \left(e^{\frac{eV}{nkT}} - 1 \right) - i_f \quad (1)$$

dove i_s è la corrente inversa di saturazione, n il fattore di idealità (in condizioni ideali $n = 1$), che dipende dal tipo di giunzione. Il rapporto kT/e (ove k è la costante di Boltzmann, e la carica elementare, T la temperatura assoluta) risulta di circa 26 mV se $T = 300$ K.

Graficando la (1) si ottiene la caratteristica i/V di un fotodiodo, come risulta anche da esperimenti di laboratorio (vd paragrafo seguente). Si noti che la corrente fotogenerata $i_f = \sigma P$ è nulla se tale è la potenza radiante (e quindi l'illuminamento) con cui viene colpito il fotodiodo: quindi, se quest'ultimo è al buio, $i_f = 0$ e la caratteristica passerà per l'origine degli assi.

Osserviamo anche che, se $V = 0$, allora $i = -i_f$; dunque la corrente fotogenerata è una corrente di cortocircuito generata per conversione diretta di energia radiante in energia elettrica. Questo fenomeno è sfruttato nelle celle solari fotovoltaiche.

La tensione a vuoto (cioè con corrente nulla) ai capi della giunzione si ottiene ponendo $i = 0$ nella (1); si ottiene:

$$V = \frac{nkT}{e} \cdot \ln \left(1 + \frac{i_f}{i_s} \right)$$

Per tensioni inverse $V < 0$, molto grandi in valore assoluto, l'intensità di corrente diviene: $i = -(i_s + i_f)$.

3.1.1. Determinazione sperimentale della caratteristica di un fotodiodo.

Costruito il circuito potenziometrico in figura, si fa variare la tensione ai capi del fotodiodo non illuminato, polarizzato direttamente. Si leggono i valori della d.d.p. V (V) e dell'intensità di corrente i (mA) e si costruisce il relativo grafico. Invertiti i collegamenti del fotodiodo si rifanno letture di coppie V (V) e i (μ A).

Si ripete l'intera esperienza con il fotodiodo illuminato da una sorgente artificiale posta ad una certa distanza: con un fotometro si può misurare anche l'illuminamento L (lx), che rimane costante per la durata della prova.

Si può rifare il tutto con un altro illuminamento e così via.

Tracciando per ogni prova la curva caratteristica, si vede come essa dipenda dall'illuminamento del fotodiodo.

3.2. Fotoresistori o fotoconduttori.

In un blocchetto di materiale semiconduttore sottoposto a radiazione luminosa si manifesta una variazione di conduttanza proporzionale alla potenza radiante raccolta. Questo fenomeno, detto fotoconducibilità, fu osservato nel selenio da W. Smith già nel 1873, anno che si può ritenere come l'inizio della fotoelettronica.

Il componente che ne deriva, il fotoresistore o fotoconduttore, è un composto semiconduttore di tipo n, disposto in un sottile strato sinterizzato su cui sono depositati due elettrodi metallici a forma di pettine, per ottenere la massima superficie possibile (vd figura). Tra i materiali più usati, il solfuro di cadmio CdS e il solfuro di piombo PbS. Un fotoresistore presenta resistenza variabile da qualche decina di Ω con illuminamento dell'ordine di 1000 lx a oltre 1 M Ω al buio.

La sensibilità spettrale di una fotoresistenza ha un massimo variabile a seconda del materiale: per il CdS è sui 540 nm, molto vicina a quella dell'occhio umano.

Il fotoresistore ha grande importanza applicativa. Con esso si costruiscono i vidicon, componenti per la ripresa delle immagini. Il fotoresistore è usato anche per la costruzione di sensori, luxmetri ed esposimetri, fotocopiatrici, stampanti laser,...

3.2.1. Determinazione sperimentale della caratteristica di un fotoresistore.

Si utilizza lo stesso circuito del precedente esperimento. Dapprima si fanno le letture con la fotoresistenza al buio. Poi si ripete l'esperienza con altri valori dell'illuminamento. Per ogni caso si traccia la curva caratteristica. Si nota una buona proporzionalità tra V ed i. Di conseguenza, si determina per ogni prova la resistenza del fotoconduttore.

3.2.2. Studio sperimentale della dipendenza della resistenza dall'illuminamento.

Si collegano i terminali del fotoresistore con un ohmetro. Molto vicino al fotoconduttore si pone l'elemento sensibile di un luxmetro, che, a sua volta sarà ancora una fotoresistenza. Poi si procede ad illuminare in vario modo il fotoresistore, rilevando ogni volta resistenza R(Ω) e illuminamento L(lx). Fatto il grafico di R in funzione di L, si può prevedere un legame del tipo:

$$R = k L^{-\alpha} \quad ; \quad \text{passando ai logaritmi: } \ln R = \ln k - \alpha \ln L .$$

Per confermare la previsione si traccia il grafico di $\ln R$ in funzione di $\ln L$ e si ricavano le costanti k e α .

4. Effetto fotovoltaico

Si produce senza che sia fornita dall'esterno una d.d.p.. L'effetto fotovoltaico è conseguente ad una illuminazione di una giunzione np dei semiconduttori e si manifesta con la comparsa di una f.e.m.. Nella sostanza l'effetto fotovoltaico si riconduce all'effetto fotoelettrico interno.

4.1. Cella solare o cella fotovoltaica.

Le celle solari sono sostanzialmente dei fotodiodi fatti lavorare nel quarto quadrante della caratteristica tensione/corrente, dove $V > 0$ e $i < 0$ indica che la cella eroga energia elettrica.

Un'applicazione delle celle solari potrebbe essere nella costruzione di centrali elettriche alternative a quelle standard.

Sapendo che la costante solare al suolo è $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$, per ottenere una potenza di picco di 100 MW, tipica di una centrale medio-piccola, con un rendimento del 10%, è necessario usare ben 1 km^2 di celle. Per celle al Si, questa è circa l'area delle fette consumate annualmente per la produzione mondiale dei componenti a semiconduttore. Inoltre il costo delle celle non consente ancora una buona competitività rispetto alle altre fonti energetiche.

Nel decennio '75-'85, al fotovoltaico come fonte alternativa è stato dedicato un notevole sforzo di ricerca, che non ha consentito di raggiungere ancora gli obiettivi di prestazione e di economicità necessari. Al presente, la potenza complessiva degli impianti fotovoltaici attivi totalizza solo 50 MW.

Il fotovoltaico è invece soluzione adottata ingegneristicamente in applicazioni dove il costo non è di primaria importanza, come nello spaziale (alimentazione dei satelliti), nelle piccole utenze lontano dalla rete (trasmettitori radio, località montane o difficilmente raggiungibili,...).

Per la cella solare vale ancora la (1) vista per il fotodiode. Considerevoli sono, dal punto di vista elettrico, due parametri: la corrente di corto circuito i_c e la tensione a vuoto V_v .

Risulta

$$i_c = -i_s, \text{ per } V=0, \text{ ossia } i_c = -i_f.$$

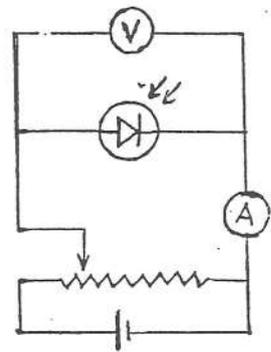
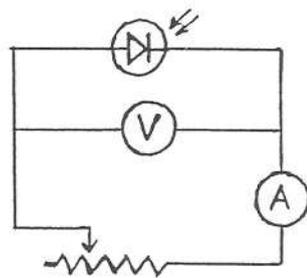
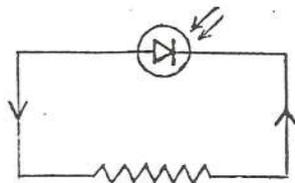
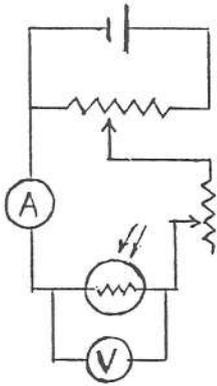
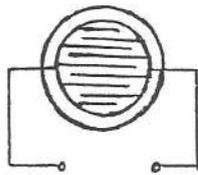
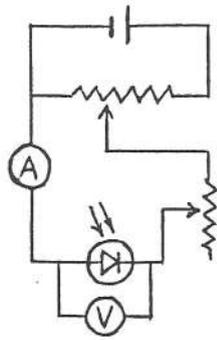
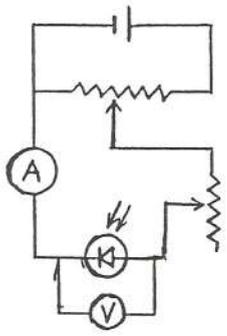
Detta E_g l'energia di gap ($E_g = e V_g$), se $i_s = i_1 \exp(-V_g/V_t)$, posto $V_t = kT/e$ (25mV a temperatura ambiente), risulta

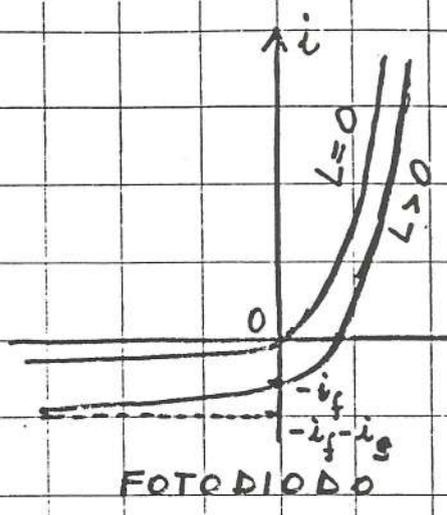
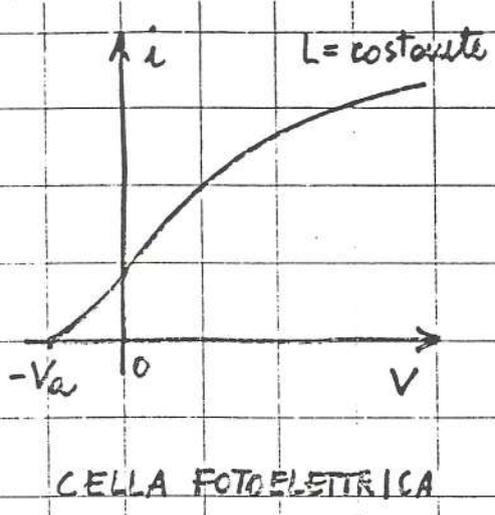
$$V_v = V_g, \text{ per } i=0, \text{ ossia } V_v = V_t \ln(1 + i_f/i_1 \exp(V_g/V_t)), \text{ cioè } V_v \approx V_g + V_t \ln(i_f/i_1), \text{ con approssimazione.}$$

4.1.1. Determinazione sperimentale della caratteristica di una cella solare.

Si prepara il circuito in figura senza alimentatore e si leggono le coppie (V, i) , relativamente ad un determinato illuminamento della cella. Si ripete l'esperienza per altri valori dell'illuminamento. Infine si tracciano le curve caratteristiche tutte sullo stesso diagramma. La potenza elettrica erogata $P = V i$ è massima quando la caratteristica, per un dato illuminamento, risulta tangente all'iperbole di equazione $V i = P$.

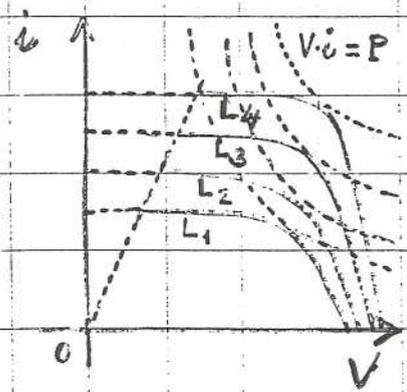
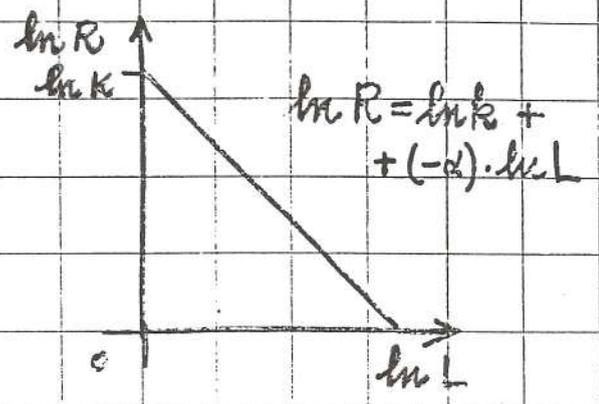
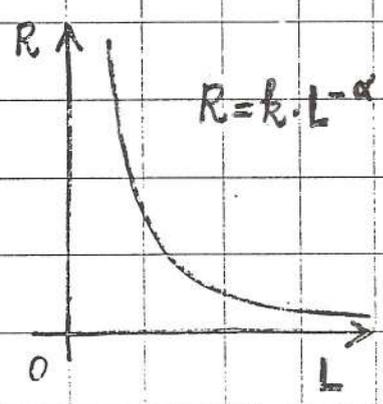
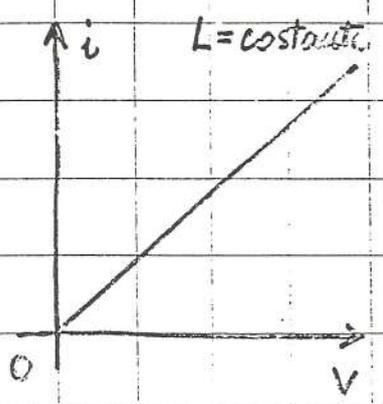
Se si vuole tracciare la caratteristica al buio, si inserisce un alimentatore in cc; si ritrova la curva tipica di un fotodiode.



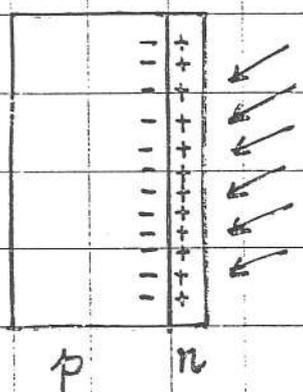


$$(*) i = -i_f + i_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{kT}{e}$$



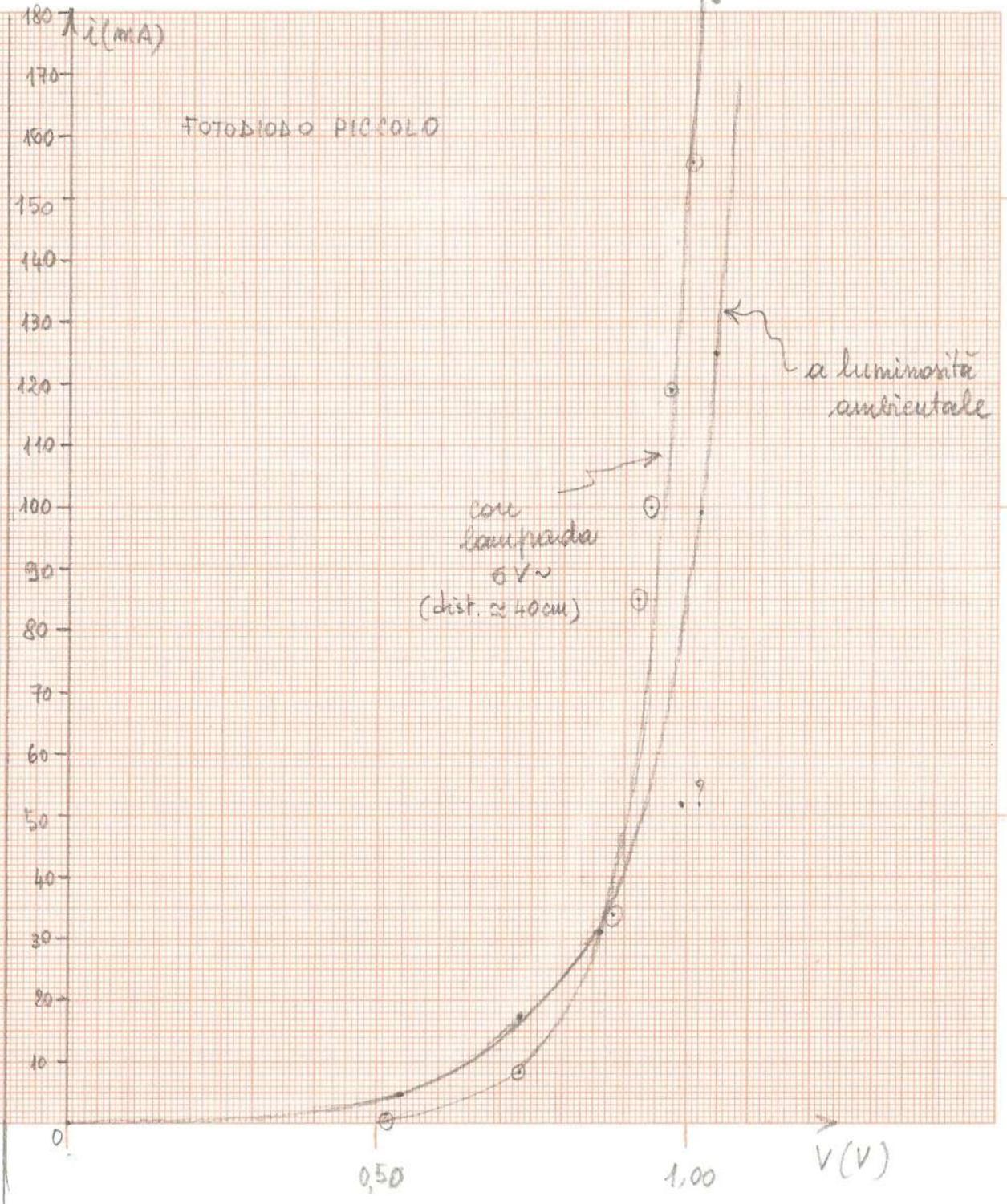
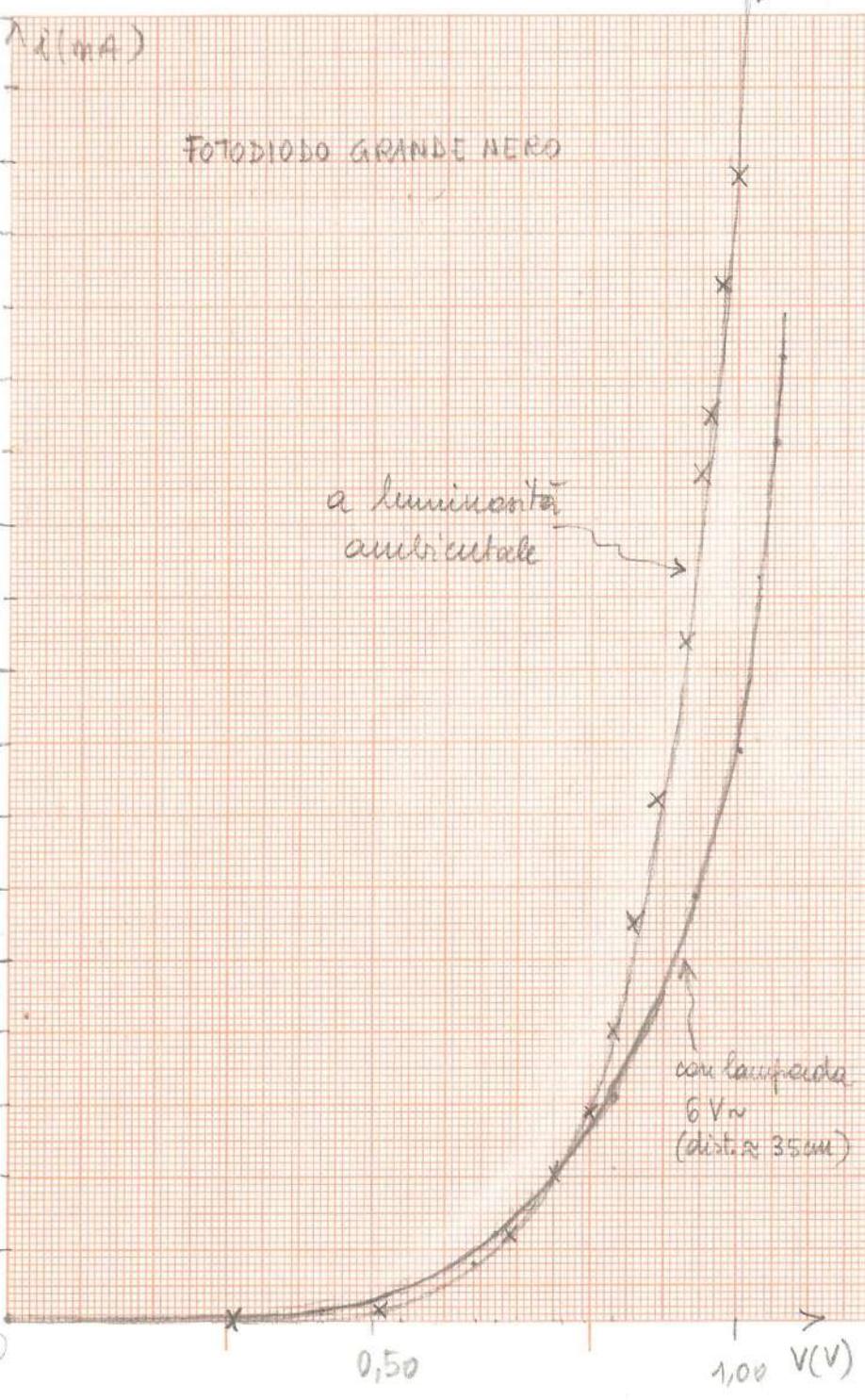
$$L_1 < L_2 < L_3 < L_4$$



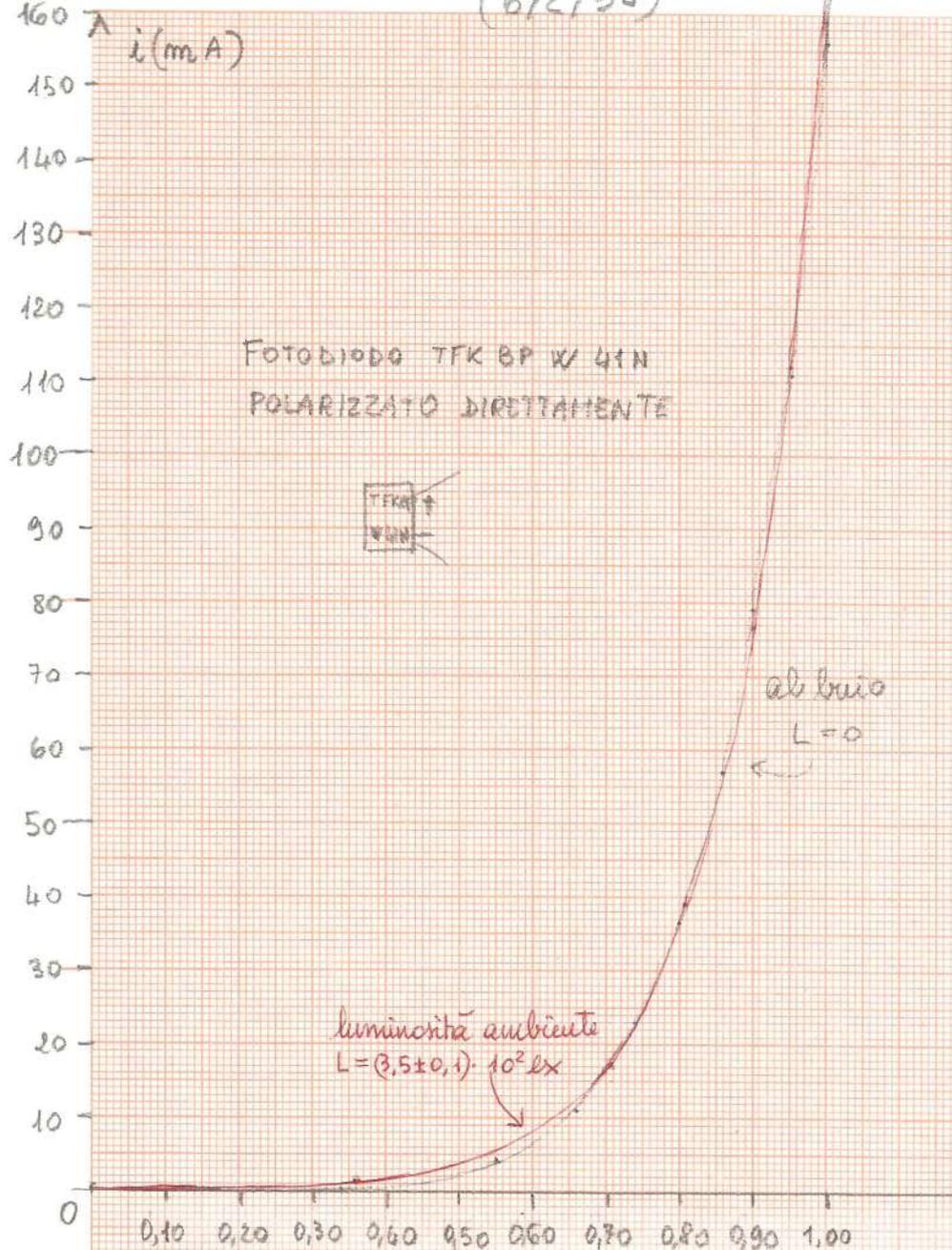
$$(Si+B) \quad (Si+P)$$

- corrente di corto circuito i_c :
da (*), per $V=0$, risulta: $i_c = -i$, cioè $i_c = -i_f$
- tensione a vuoto V_v :
da (*), detta E_g l'energia di gap ($E_g = eV_g$), se $i_s = i_0 \cdot e^{-\frac{V_g}{V_T}}$
 $\Rightarrow V_v = V$, per $i=0$; cioè: $V_v = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{i_f}{i_0} \cdot e^{\frac{V_g}{V_T}} \right)$
 ossia $V_v \approx V_g + V_T \cdot \ln \left(\frac{i_f}{i_0} \right)$

FOTODIODO (30/1/98)



(6/2/98)

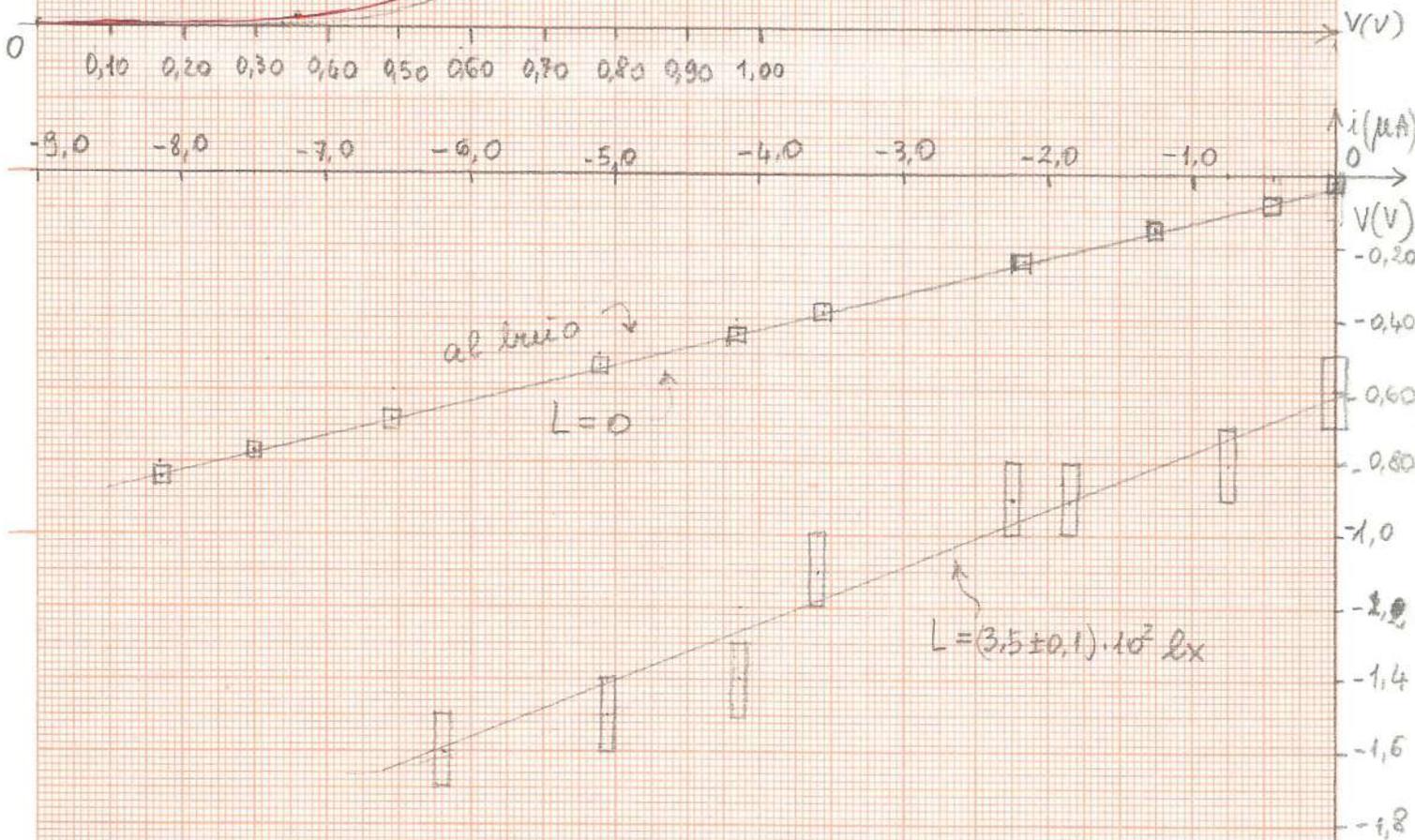


V (V)	i (μA)	V (V)	i (μA)
0,01	0,03	0,01	0,83
0,16	$0,02 \cdot 10^3$	0,36	$1,45 \cdot 10^3$
0,34	$0,29 \cdot 10^3$	0,55	$4,34 \cdot 10^3$
0,55	$4,28 \cdot 10^3$	0,71	$16,6 \cdot 10^3$
0,66	$11,2 \cdot 10^3$	0,81	$38,8 \cdot 10^3$
0,74	$23,0 \cdot 10^3$	0,90	$77,6 \cdot 10^3$
0,80	$36,4 \cdot 10^3$	0,95	$112 \cdot 10^3$
0,86	$57,2 \cdot 10^3$	1,00	$159 \cdot 10^3$
0,90	$79 \cdot 10^3$		
0,95	$111 \cdot 10^3$		
1,00	$156 \cdot 10^3$		
0	$-0,02 \pm 0,2$	0	$-0,6 \pm 0,1$
-0,47	-0,07	-0,74	-0,8
-1,25	-0,15	-1,83	-0,9
-2,16	-0,24	-2,27	-0,9
-3,57	-0,38	-3,58	-1,1
-4,17	-0,44	-4,17	-1,4
-5,08	-0,53	-5,05	-1,5
-6,57	-0,68	-6,18	-1,6
-7,49	-0,77		
-8,17	-0,84		

POLARIZZAZIONE DIRETTA

POLARIZZAZIONE INVERSA

AL BUIO $L=0$ A LUMINOSITA' AMBIENTE $L=350 \text{ lx}$

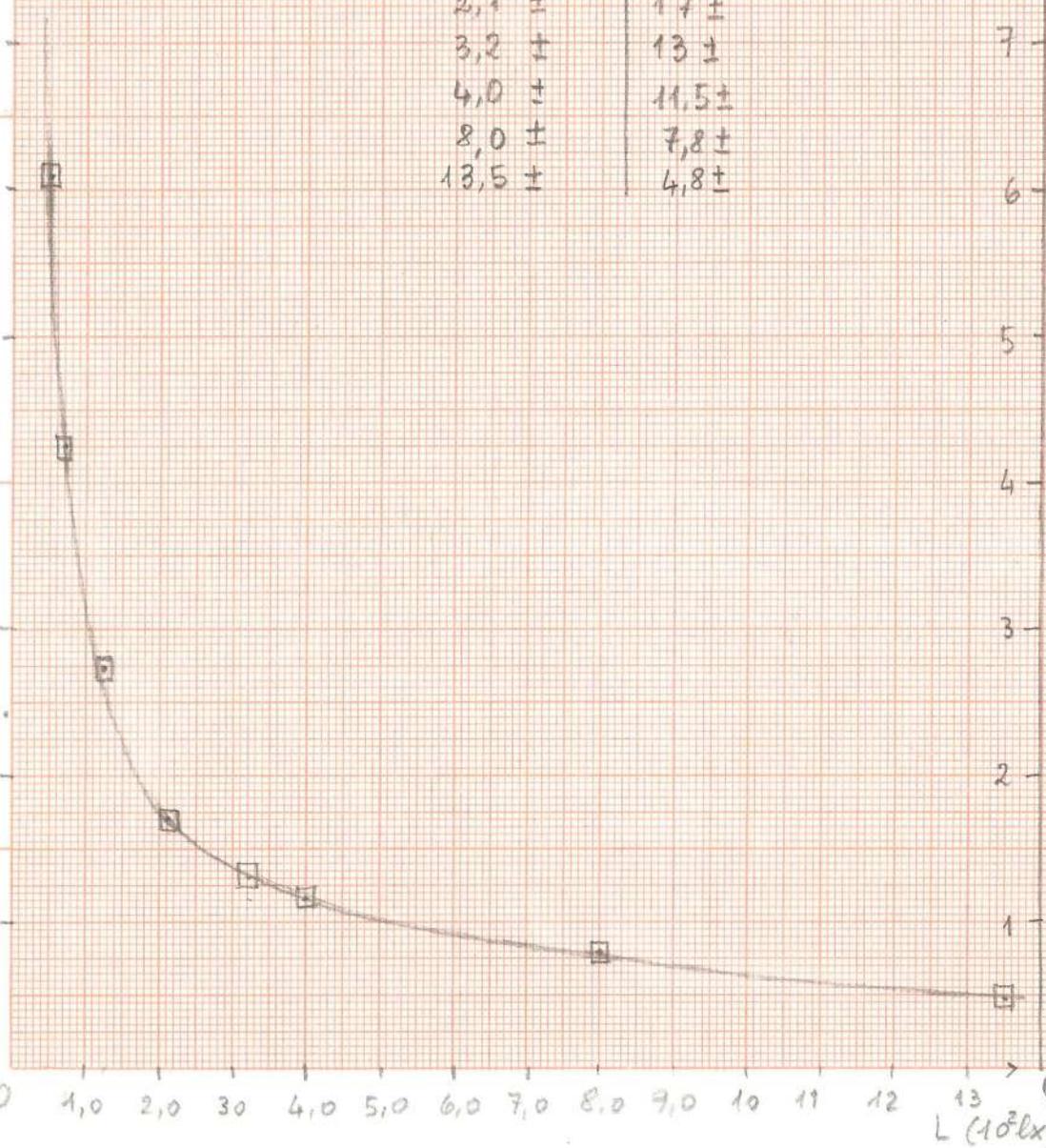


FOTODIODO TFK BP W 41N CONTROPOLARIZZATO

FOTORESISTORE : RESISTENZA e ILLUMINAMENTO (3/2/98)

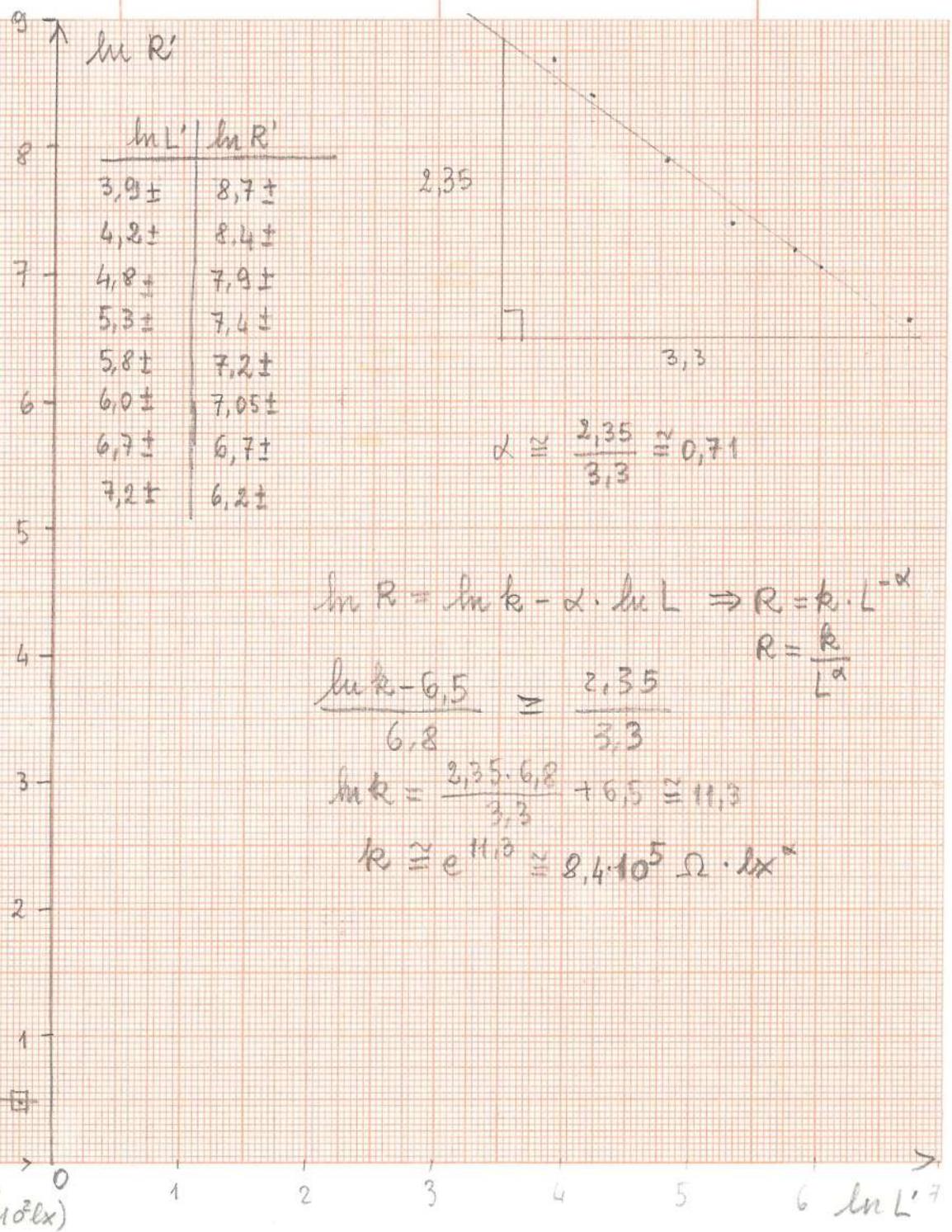
$R (10^3 \Omega)$

$L (10^2 \text{ lx})$	$R (10^3 \Omega)$
0,50 ±	62 ±
0,70 ±	45 ±
1,25 ±	28 ±
2,1 ±	17 ±
3,2 ±	13 ±
4,0 ±	11,5 ±
8,0 ±	7,8 ±
13,5 ±	4,8 ±



$\ln R'$

$\ln L'$	$\ln R'$
3,9 ±	8,7 ±
4,2 ±	8,4 ±
4,8 ±	7,9 ±
5,3 ±	7,4 ±
5,8 ±	7,2 ±
6,0 ±	7,05 ±
6,7 ±	6,7 ±
7,2 ±	6,2 ±



$$\alpha \approx \frac{2,35}{3,3} \approx -0,71$$

$$\ln R = \ln k - \alpha \cdot \ln L \Rightarrow R = k \cdot L^{-\alpha}$$

$$R = \frac{k}{L^\alpha}$$

$$\frac{\ln k - 6,5}{6,8} = \frac{2,35}{3,3}$$

$$\ln k = \frac{2,35 \cdot 6,8}{3,3} + 6,5 \approx 11,3$$

$$k \approx e^{11,3} \approx 8,4 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{lx}^\alpha$$

FOTORESISTENZA (30/1/98)

ESPERIMENTI (1)
 I (mA)

ESPER. (2)
 1,2 — 60
 1,1 —
 1,0 — 50
 0,9 —
 0,8 — 40
 0,7 —
 0,6 — 30
 0,5 —
 0,4 — 20
 0,3 —
 0,2 — 10
 0,1 —

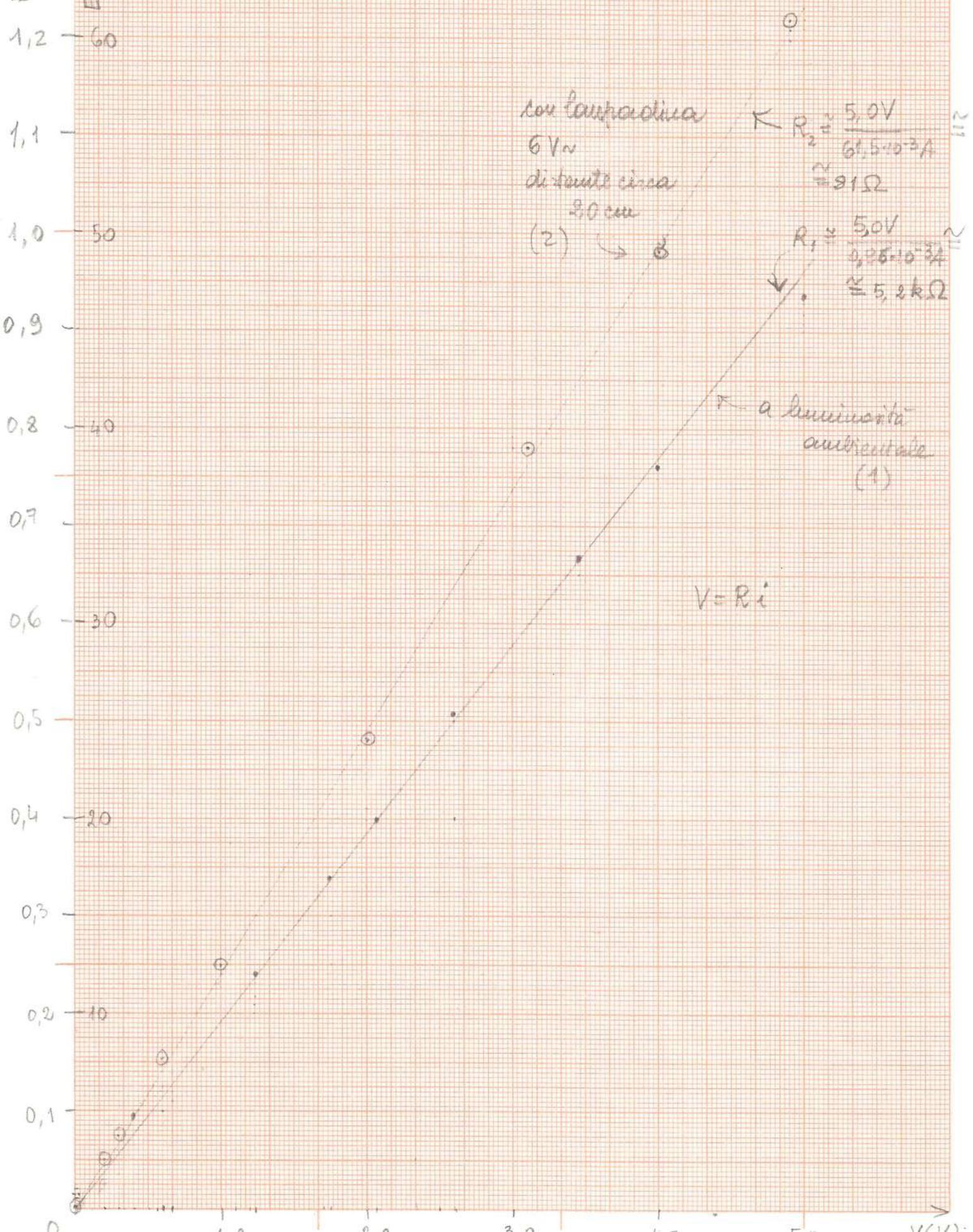
con lampadina
 6V
 distante circa
 30 cm
 (2) →

$$R_2 = \frac{5,0V}{61,5 \cdot 10^{-3}A} \approx 81 \Omega$$

$$R_1 = \frac{5,0V}{9,25 \cdot 10^{-3}A} \approx 5,2 k\Omega$$

→ a luminosità
 ambiente
 (1)

$$V = R \cdot i$$



9/3/98

ln R

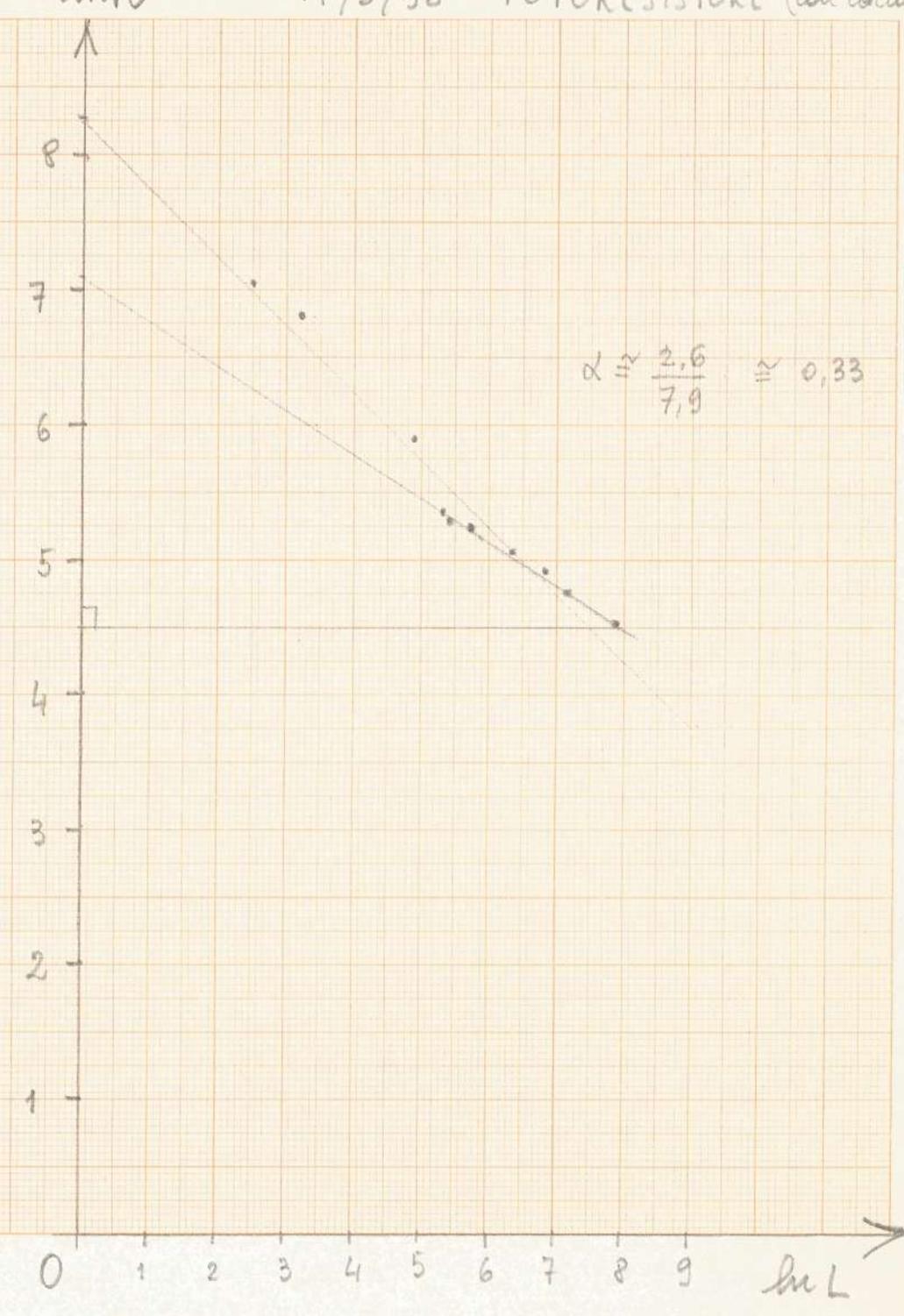
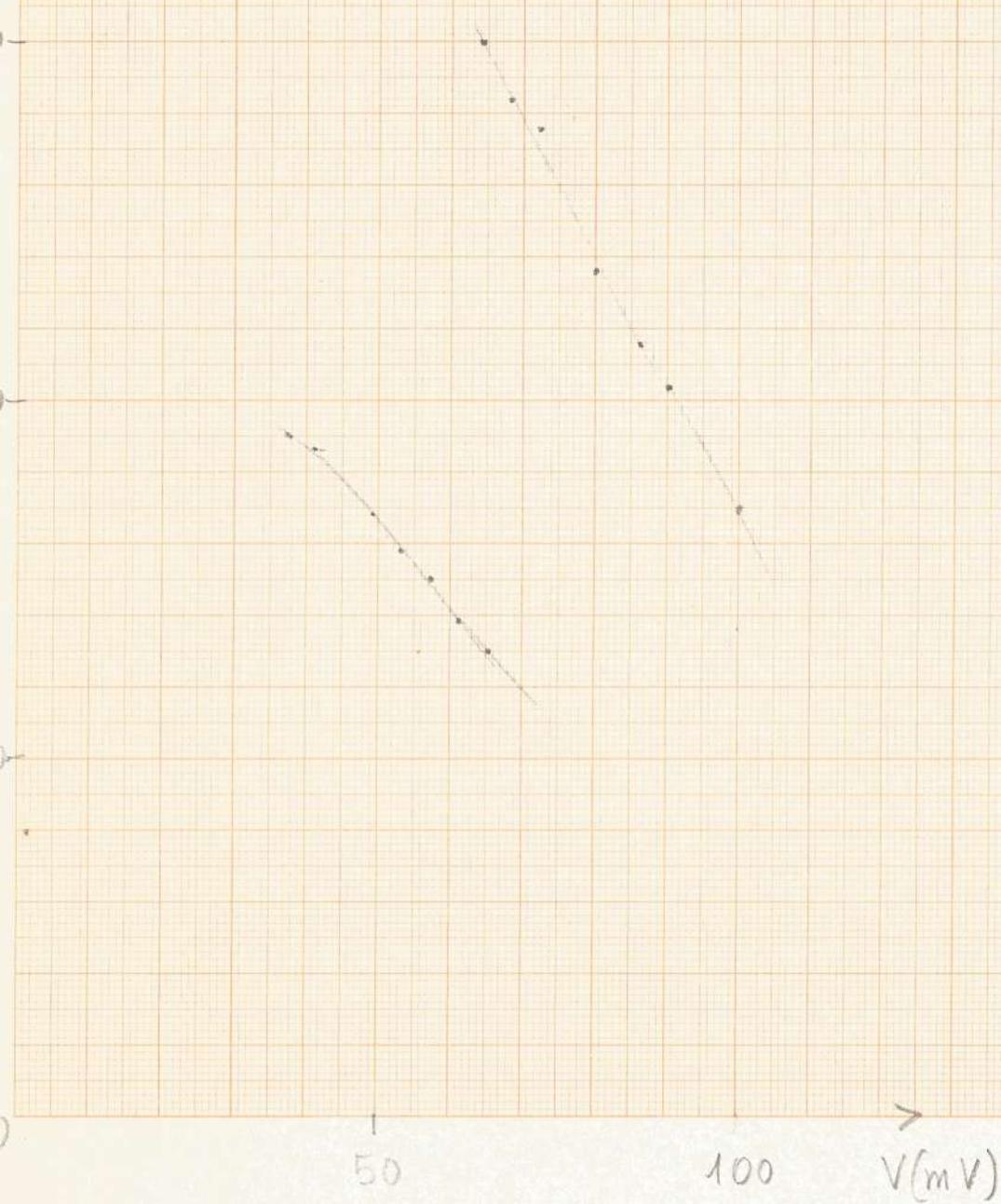
11/3/98

FOTORESISTORE (con coccodrini)

$\lambda i (\mu A)$

cella fotovoltaica (senza alimentatore)

recostato da $1 k\Omega$



$$h\nu - h\nu_0 = eV_a = \frac{1}{2}mv^2$$

cella fotovoltaica

