

# Esercitazione 14 - Gruppo AC

## Misura della costante di assorbimento del mylar usando un amplificatore lock-in

Marco Cilibrasi

Tommaso Pajero

7 maggio 2015

Nel corso dell'esercitazione si monta un amplificatore sincrono sensibile alla fase (altrimenti noto come *lock-in*) e lo si utilizza per misurare il coefficiente di assorbimento del *mylar*.

### 2.a Amplificatore di potenza e preamplificatore

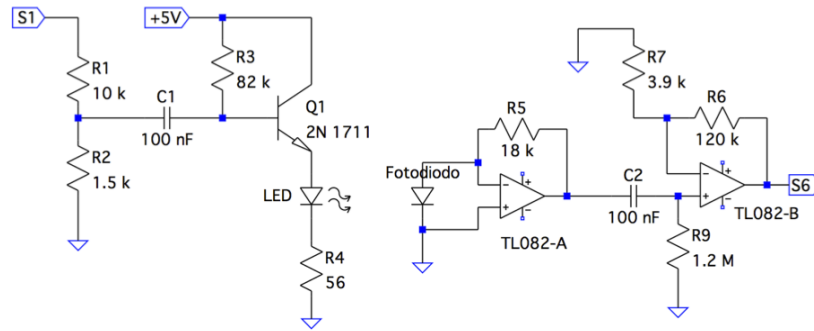


Figura 1: Circuito che implementa l'amplificatore di potenza dell'alimentazione per il LED e il preamplificatore del segnale in uscita dal fotodiodo.

Si è montato il circuito in figura 1 con le componenti riportate in tabella 1, e si è inviata all'entrata  $S_1$  un'onda sinusoidale di ampiezza  $V_{in}^{pp} = 6.0 \pm 0.2$  V e frequenza  $1.00 \pm 0.01$  kHz<sup>1</sup>. Si sono collegati due condensatori elettrolitici da  $10 \pm 1$   $\mu$ F tra le tensioni di alimentazione a  $\pm 5$  V usate per gli OpAmp<sup>2</sup> e la terra, in modo da stabilizzarle. Sempre per diminuire eventuali rumori, il LED è stato fissato alla basetta per mezzo di un cavetto, in modo da limitare i suoi movimenti indesiderati, che avrebbero fatto variare l'intensità luminosa assorbita dal fotodiodo. Quest'ultimo è stato montato in linea con il LED (i cui piedini sono stati opportunamente piegati), alla stessa altezza in modo da massimizzare il numero di fotoni incidenti, e a una distanza di circa 5 mm, così che fosse possibile interporre fra i due componenti un numero ragionevole di piastrelle di *mylar* senza rischiare di toccare il LED.

Come atteso, all'ingresso del LED (acceso) si è osservata una tensione sinusoidale oscillante sovrapposta a un *offset* continuo (cfr. figura 2).

All'uscita  $S_6$ , invece, si è osservata un'onda sinusoidale (leggermente distorta e con un *offset* di circa -130 mV<sup>3</sup>), cui era sovrapposto un rumore non trascurabile riconducibile alla luce ambientale. Infatti, schermato il fotodiodo dalle lampade della stanza coprendolo con una mano (cfr. figura 3.a), il segnale diventava molto più stabile, di ampiezza  $V_{S6}^{pp} = 1.49 \pm 0.07$  V<sup>4</sup>, con un rumore di ampiezza picco-picco  $35 \pm 5$  mV. Se invece non si effettuava la schermatura del fotodiodo, il rumore aveva ampiezza  $300 \pm 50$  mV, con una componente periodica di frequenza 100 Hz, riconducibile alla rete elettrica di alimentazione delle lampade (figura 3.b). In effetti, se si spegneva il generatore di funzioni, si osservava su  $S_6$  un segnale simile all'opposto del valore

<sup>1</sup>Si è utilizzata una resistenza più bassa di quella consigliata per  $R_2$ , in modo da diminuire l'ampiezza del segnale in entrata al preamplificatore. Utilizzando  $R_2 = 1.48 \pm 0.1$  k $\Omega$ , infatti, il segnale all'uscita  $S_6$  risultava tagliato nella parte superiore della sinusoide, a causa della saturazione dell'OpAmp.

<sup>2</sup>E in seguito per il quad CMOS analog switch.

<sup>3</sup>Per la spiegazione di questo fatto, inatteso ( $C_2$  dovrebbe tagliare la componente continua del segnale generato dal fotodiodo, e effetti non ideali del funzionamento dell'OpAmp non giustificano un *offset* superiore a qualche decina di mV), si veda il punto 2.e.

<sup>4</sup>La misura è stata presa più volte, sfruttando la modalità di acquisizione di una singola schermata dell'oscilloscopio.

Tabella 1: Componenti utilizzati per montare il circuito in figura 1.

Componente	Valore
$R_1$	$9.92 \pm 0.08 \text{ k}\Omega$
$R_2$	$686 \pm 5 \Omega$
$R_3$	$81.6 \pm 0.7 \text{ k}\Omega$
$R_4$	$54.8 \pm 0.4 \Omega$
$R_5$	$17.70 \pm 0.14 \text{ k}\Omega$
$R_6$	$117.5 \pm 0.9 \text{ k}\Omega$
$R_7$	$3.84 \pm 0.03 \text{ k}\Omega$
$R_9$	$1.24 \pm 0.01 \text{ M}\Omega$
$C_1$	$105 \pm 4 \text{ nF}$
$C_2$	$102 \pm 4 \text{ nF}$

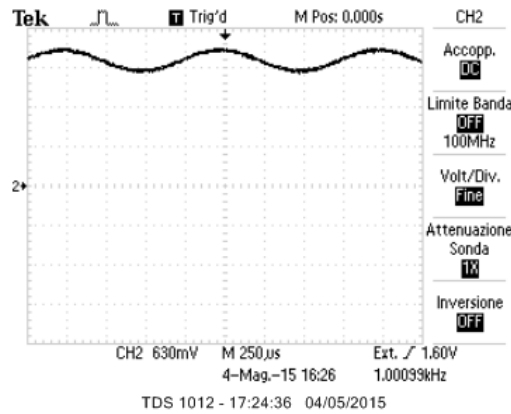


Figura 2: Tensione in entrata al LED.

assoluto di una sinusoide, di ampiezza picco-picco  $230 \pm 9 \text{ mV}^5$ . Infine, si è effettuata una misura della tensione su  $S_6$  dopo aver interposto quattro piastrelle di *mylar* tra il LED e il fotodiodo (sempre schermando la luce ambientale), ottenendo un valore ragionevolmente più basso di prima:  $V_{S_6}^{pp} = 776 \pm 50 \text{ mV}$  (figura 3.d).

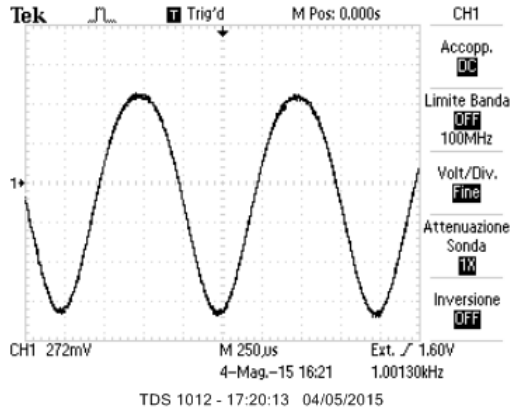
## 2.b Adattamento di fase: sfasatore di $90^\circ$ e sfasatore a fase variabile

Abbiamo montato il circuito in figura 4 usando gli OpAmp TL081, un deviatore, un transistor BC182 (e non 2N1711 come illustrato in figura) e i componenti riportati in tabella 2<sup>6</sup>. Abbiamo quindi aggiustato il trimmer  $P_1$  in modo che la differenza di fase tra  $S_1$  e  $S_2$  fosse  $90^\circ$  (cfr. figura 5). In particolare, su un periodo  $T = 1000 \pm 3 \mu\text{s}$ , abbiamo misurato uno sfasamento  $\Delta T = 250 \pm 2 \mu\text{s}$ , con il segnale  $S_2$  in anticipo rispetto a  $S_1$ . Successivamente abbiamo cercato di regolare il trimmer  $P_3$  in modo che l'onda quadra in  $S_3$  avesse *duty cycle* pari al 50%. Tuttavia, si è osservato che tale parametro variava a seconda che il deviatore stesse nella posizione  $0^\circ$  o  $90^\circ$ <sup>7</sup>. Si è cercato di raggiungere un compromesso, ottenendo per la durata del fronte positivo  $T_{0^\circ}^{pos} = 487 \pm 2 \mu\text{s}$  e  $T_{90^\circ}^{pos} = 514 \pm 2 \mu\text{s}$ . Quindi, abbiamo verificato che agendo sul deviatore si variasse la fase di uscita di  $S_3$  di  $90^\circ$ , (con il segnale relativo a  $90^\circ$  in anticipo, si veda la figura 6), misurando  $\Delta T = 254 \pm 4 \mu\text{s}$ . Infine, abbiamo quantificato entro quali limiti si potesse sfasare  $S_3$  rispetto a  $S_1$  attraverso il trimmer  $P_2$ , misurando una traslazione massima di  $T_{sfas} = 428 \pm 2 \mu\text{s}$  (corrispondente a uno sfasamento minore di  $\pi$ ) per entrambe le posizioni del deviatore.

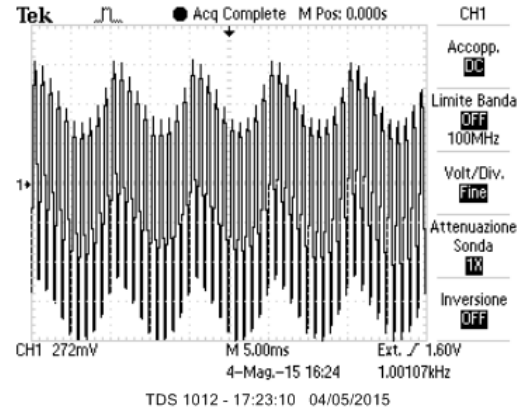
<sup>5</sup>Ciò è in accordo con le attese: la rete elettrica fornisce, infatti, un'onda sinusoidale di frequenza  $50\text{Hz}$  e le lampadine agiscono da rettificatori (non distinguono  $+I$  da  $-I$ ).

<sup>6</sup>Naturalmente - non lo ripeteremo più avanti -, le uscite  $S_i$  (in questo caso  $S_1$ ) sono collegate al momento del montaggio del circuito a quelle aventi lo stesso nome e già presenti nei circuiti realizzati precedentemente.

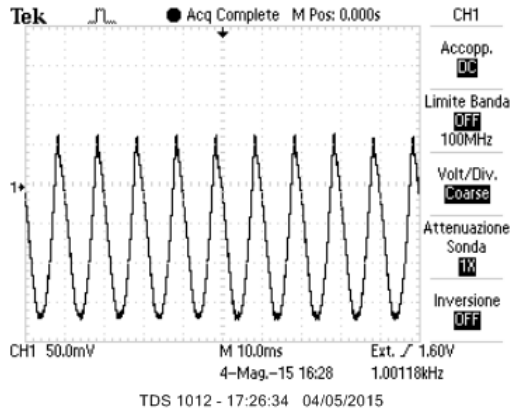
<sup>7</sup>Ciò è dovuto al fatto che lo sfasatore a fase variabile vede una resistenza in ingresso diversa a seconda che il deviatore si trovi nella posizione  $0^\circ$  oppure  $90^\circ$ .



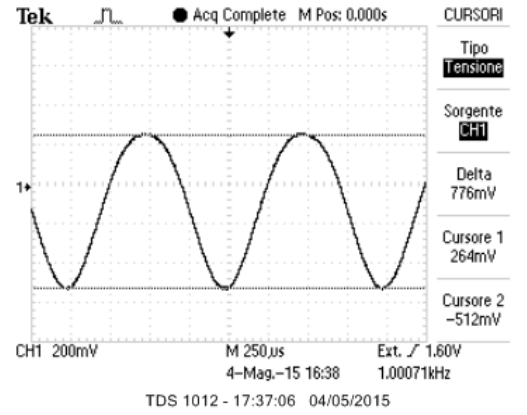
(a) Acquisizione effettuata proteggendo il fotodiodo dalla luce ambientale con una mano (modalità di acquisizione di una schermata singola).



(b) Acquisizione senza schermatura della luce ambientale: è ben visibile il rumore della rete elettrica a 100 Hz.



(c) Acquisizione senza schermatura della luce ambientale e con  $V_{in} = 0$ : si evidenzia il rumore a 100 Hz.



(d) Acquisizione effettuata proteggendo il fotodiodo dalla luce ambientale con una mano, interponendo quattro piastine di *mylar* fra il LED e il fotodiodo.

Figura 3: Misure di tensione all'uscita S6.

Tabella 2: Componenti utilizzati per montare il circuito in figura 4.

Componente	Valore
$R_8$	$215 \pm 2 \text{ k}\Omega$
$R_{10}$	$26.6 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$
$R_{11}$	$9.91 \pm 0.08 \text{ k}\Omega$
$R_{12}$	$26.6 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$
$R_{13}$	$0.983 \pm 0.008 \text{ k}\Omega$
$R_{14}$	$21.6 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$
$R_{15}$	$21.6 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$
$R_{16}$	$9.93 \pm 0.08 \text{ k}\Omega$
$R_{17}$	$3.22 \pm 0.03 \text{ k}\Omega$
$P_1$	$9.69 \pm 0.08 \text{ k}\Omega$
$P_2$	$97.4 \pm 0.8 \text{ k}\Omega$
$P_3$	$102.2 \pm 0.8 \text{ k}\Omega$
$C_3$	$9.7 \pm 0.4 \text{ nF}$
$C_4$	$10.9 \pm 0.4 \text{ nF}$

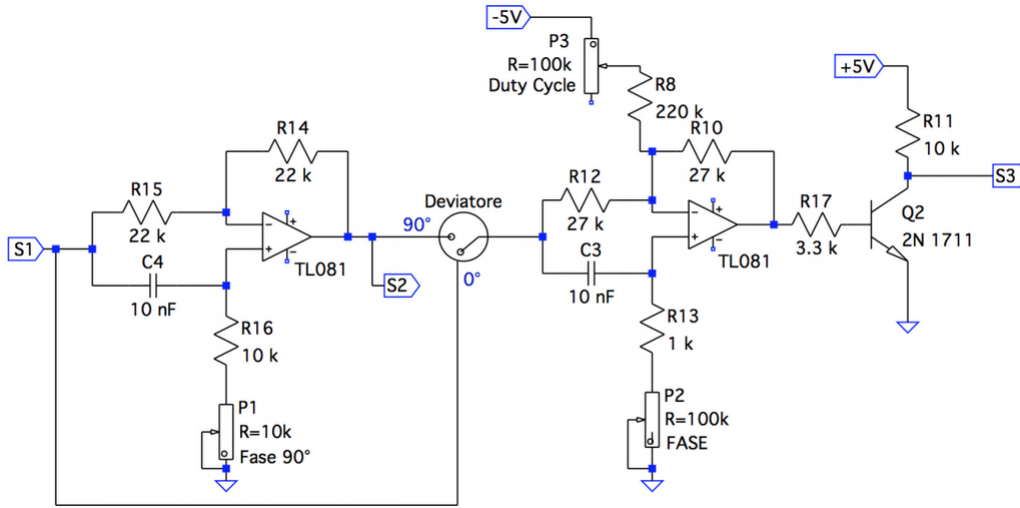
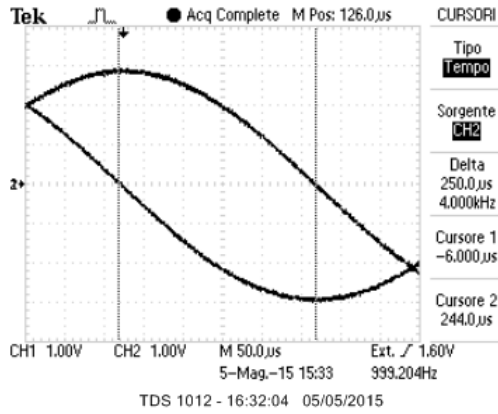
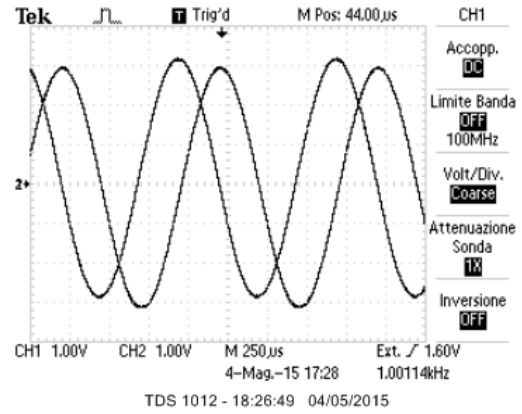


Figura 4: Circuito sfasatore di 90° e sfasatore a fase variabile.



(a) Misura dello sfasamento.



(b) Figura osservata all'oscilloscopio.

Figura 5: Sfasamento tra il segnale  $S_1$  sul CH1 e il segnale  $S_2$  (in anticipo rispetto a  $S_1$ ) sul CH2.

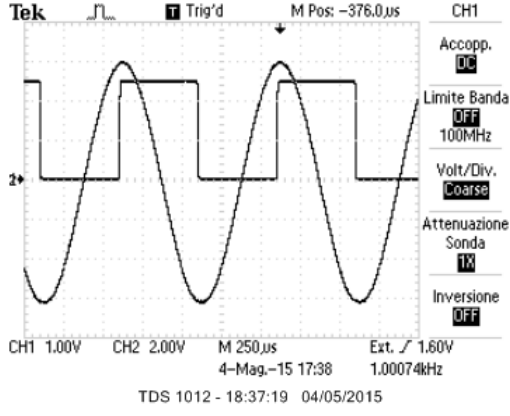
## 2.c Squadratore e campionatore

Abbiamo montato il circuito squadratore e campionatore in figura 7 utilizzando 3 porte logiche NAND SN7400, verificando che le due onde quadre in  $S_4$  e  $S_5$  fossero in opposizione di fase, come si può vedere in figura 8. Lo scopo delle due porte NAND poste successivamente al segnale  $S_3$  è quello di migliorare la forma d'onda, in modo che sia quanto più simile possibile ad un'onda quadra ideale. Il collegamento dei quattro interruttori del DG441 indicato in figura fa sì che il segnale  $S_6$  sia mandato all'uscita  $S_7$  (uscita  $S_8$  a terra) quando  $S_3$  è basso (dunque  $S_4/S_5 = 1/0$ ), e all'uscita  $S_8$  (uscita  $S_7$  a terra) quando  $S_3$  è alto ( $S_4/S_5 = 0/1$ ). I segnali osservati alle uscite  $S_7$  e  $S_8$  sono riportati, per le due posizioni del deviatore, nelle figure 9 (segnali sovrapposti) e 10 (segnali traslati verticalmente l'uno rispetto all'altro). Come previsto, tali segnali sono spezzati in due parti (la prima trasferita su  $S_7$  e la seconda su  $S_8$ ), e l'azionamento del deviatore sposta orizzontalmente il punto di taglio di  $T/4$  (tempo corrispondente a una fase di 90°).

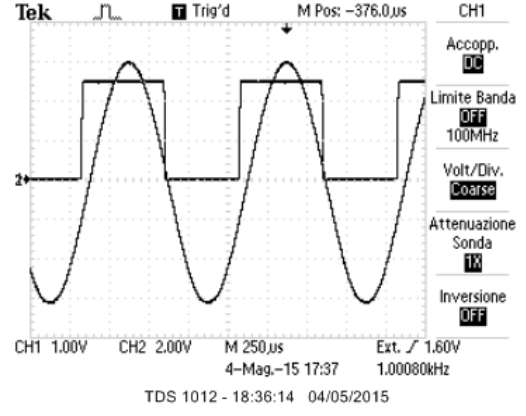
## 2.d Amplificatore differenziale e mediatore; misura del coefficiente di assorbimento del *mylar*

Si è poi montato il circuito in figura 11 utilizzando i componenti elencati in tabella 3 e due OpAmp TL081. Si è verificato che il segnale di uscita  $V_{voltmetro}$  fosse effettivamente costante tramite l'oscilloscopio, per poter poi utilizzare il voltmetro digitale, in modo da avere misure più precise<sup>8</sup>.

<sup>8</sup>L'incertezza relativa garantita dal voltmetro è del 0.5%, contro il 3% tipico dell'oscilloscopio.



(a) Deviatore in posizione  $0^\circ$ .



(b) Deviatore in posizione  $90^\circ$ .

Figura 6: Sfasamento tra  $S_1$  sul CH1 e  $S_3$  sul CH2 nei due casi (deviatore nelle posizioni  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ).

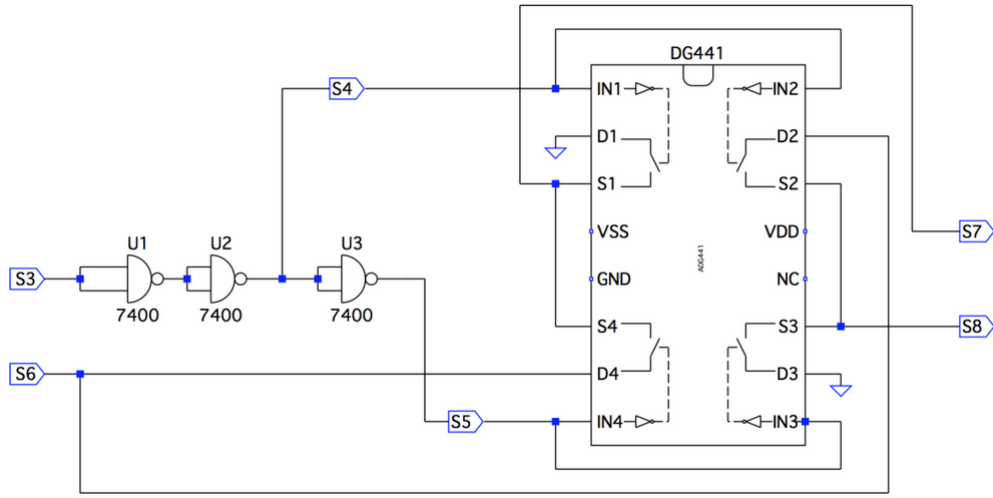


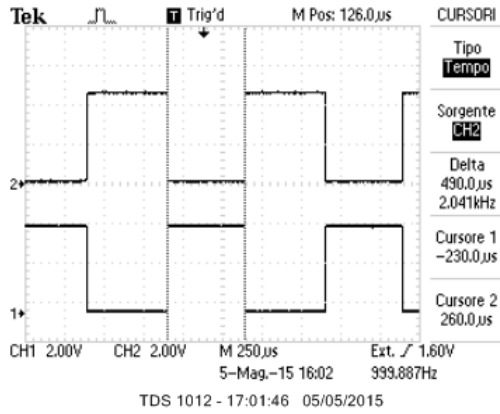
Figura 7: Circuito squadratore e campionatore.

Tabella 3: Componenti utilizzati per montare il circuito in figura 11.

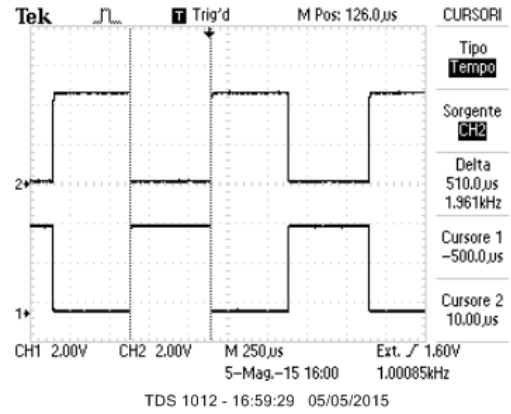
Componente	Valore
$R_{18}$	$3.29 \pm 0.04 \text{ M}\Omega$
$R_{20}$	$1.27 \pm 0.01 \text{ M}\Omega$
$R_{21}$	$1.50 \pm 0.01 \text{ M}\Omega$
$R_{22}$	$38.8 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$
$R_{23}$	$32.9 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$
$R_{24}$	$38.6 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$
$R_{26}$	$33.6 \pm 0.3 \text{ k}\Omega$
$C_5$	$222 \pm 9 \text{ nF}$
$C_6$	$45 \pm 2 \text{ nF}$

Si è regolato il potenziometro  $P_2$  in modo che, quando il deviatore era impostato sulla configurazione  $0^\circ$ , la tensione all'entrata del voltmetro fosse nulla (la misura ha restituito  $V_{voltmetro} = 0 \pm 3 \text{ mV}$ )<sup>9</sup>. Questa procedura di taratura non è stata inficiata dal fatto che il segnale  $S_6$  presentasse un *offset*, che viene sommato per un semiperiodo col segno positivo e il successivo con segno negativo (e dunque non contribuisce a spostare la media di  $V_{voltmetro}$ , confronta la figura 14). In figura 12 si riportano le forme d'onda osservate su  $S_9$  per le due

<sup>9</sup>Questa procedura, equivalente a quella suggerita nel foglio-guida di azzerare la tensione per il deviatore impostato sui  $90^\circ$ , è stata dettata dal fatto che lo sfasamento ottenibile per mezzo del potenziometro  $P_2$  era inferiore a  $\pi$ , e dalla sfortunata coincidenza che la zona inaccessibile fosse proprio quella in cui  $V_{voltmetro}$  si annullava.

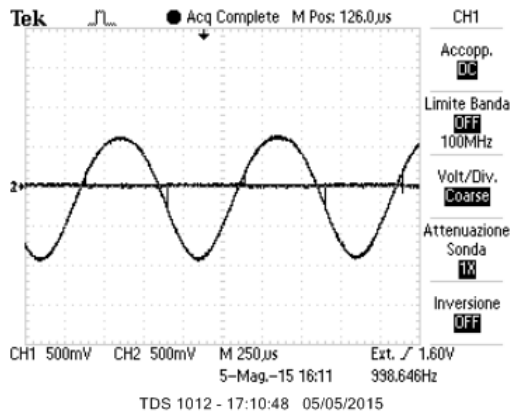


(a) Deviatore su  $0^\circ$ .

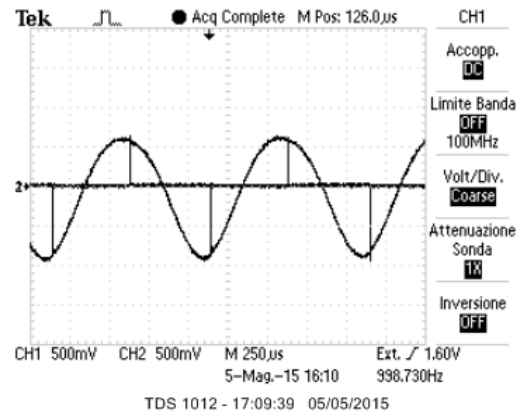


(b) Deviatore su  $90^\circ$ .

Figura 8: Onde quadre in opposizione di fase alle uscite  $S_4$  sul CH1 e  $S_5$  sul CH2 per le due posizioni del deviatore.

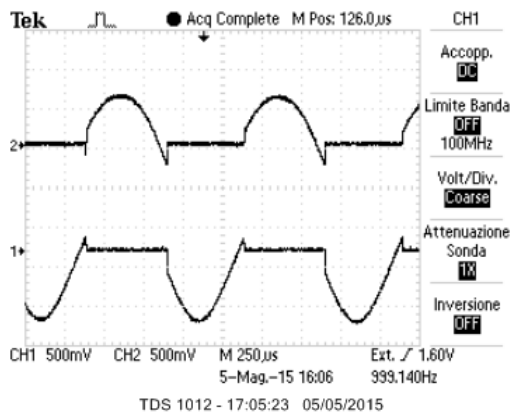


(a) Deviatore su  $0^\circ$ .

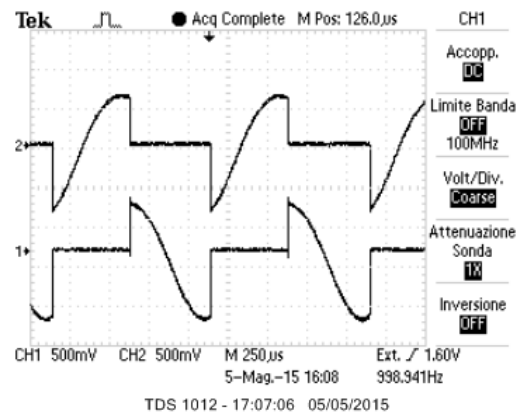


(b) Deviatore su  $90^\circ$ .

Figura 9: Segnale in uscita da  $S_7$  sul CH1 e da  $S_8$  sul CH2 per le due posizioni del deviatore (non è stato introdotto alcun *offset*).



(a) Deviatore su  $0^\circ$ .



(b) Deviatore su  $90^\circ$ .

Figura 10: Segnale in uscita da  $S_7$  sul CH1 e  $S_8$  sul CH2 per le due posizioni del deviatore; i segnali sono stati traslati verticalmente per distinguerli meglio.

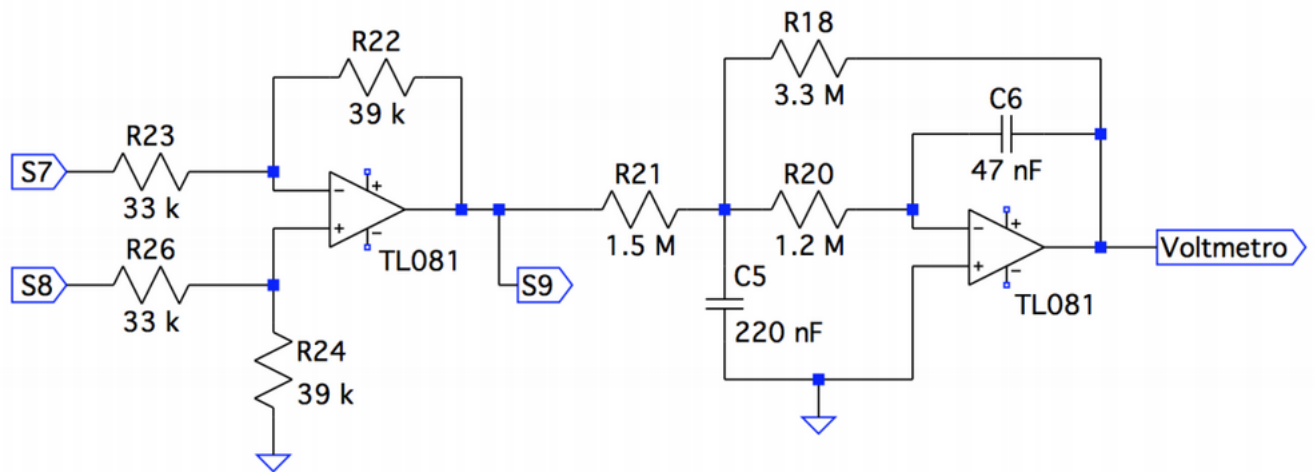
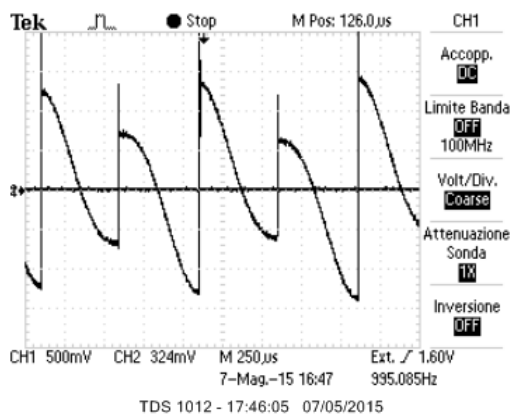
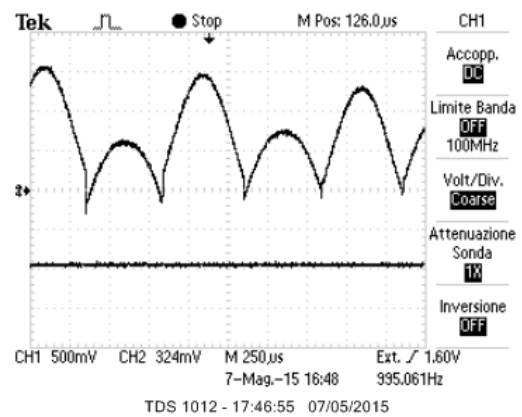


Figura 11: Circuito amplificatore differenziale e mediatore.



(a) Deviatore su  $0^\circ$ :  $S_9$  ha media nulla.



(b) Deviatore su  $90^\circ$ :  $S_9$  è (quasi sempre) positivo.

Figura 12: Segnale in uscita sul voltmetro sul CH1 (è la media di  $S_9$  cambiata di segno) e da  $S_9$  sul CH2 per le due posizioni del deviatore.

posizioni del deviatore. Quindi, si è commutata la posizione del deviatore su  $90^\circ$  e si sono prese varie misure di  $V_{voltmetro}$ , aumentando di volta in volta il numero di piastrelle di *mylar* interposte fra il LED e il fotodiodo. Le misure sono state effettuate osservando i seguenti accorgimenti:

- Si è cercato di tenere le piastrelle ben verticali e aderenti l'una all'altra, in modo che l'angolo di incidenza della luce fosse vicino a  $0^\circ$  e da evitare per quanto possibile fenomeni di riflessione multipla fra piastrelle adiacenti (che aumenterebbero artificialmente la trasmittanza);
- Le piastrelle sono state posizionate il più vicino possibile al fotodiodo per evitare di toccare il LED, il che avrebbe starato l'apparato sperimentale modificando la lettura della tensione in assenza di piastrelle. Si è altresì cercato di non urtare con le piastrelle il fotodiodo (che pure era fissato in maniera più stabile alla basetta).
- Tra una misura e l'altra, si sono sempre tolte tutte le piastrelle e si è controllato che la lettura di  $V_{voltmetro}$  senza schermatura del LED fosse compatibile entro l'incertezza con la misura iniziale (eventuali spostamenti del LED, come già accennato, potrebbero starare l'apparato di misura).
- Per stimare l'incertezza legata alla non idealità delle condizioni di misura (dovute per esempio alla non perfetta verticalità delle piastrelle, alla schermatura non perfetta della luce del LED dovuta a un loro cattivo posizionamento, a fenomeni di riflessione multipla, ecc.) si sono eseguite due serie distinte di misure, utilizzando piastrelle diverse.

Si riportano in tabella 4 le medie aritmetiche delle due serie di misure prese; la relativa incertezza è la somma in quadratura di quella strumentale, della semidisposizione delle due misure e della fluttuazione delle stesse nel tempo (in genere pari a  $1 \div 2$  mV).

Tabella 4: Tensione in ingresso al voltmetro in funzione del numero di piastrine di *mylar* interposte tra il LED e il fotodiodo.

N	V [V]	$\sigma_V$ [V]
0	0.91	0.01
1	0.709	0.006
2	0.564	0.008
3	0.44	0.01
4	0.340	0.007
5	0.256	0.007
6	0.181	0.008
7	0.131	0.005
8	0.093	0.004
9	0.055	0.003
10	0.018	0.002
11	-0.006	0.002
12	-0.026	0.004
13	-0.043	0.003
14	-0.062	0.003
15	-0.073	0.002
16	-0.084	0.002
17	-0.092	0.002
18	-0.101	0.002

Si è eseguito un *fit* dei dati raccolti utilizzando la funzione:

$$f(n) = ae^{-bN} + c \quad (1)$$

che descrive l'andamento esponenziale decrescente tipico dell'assorbimento della luce in un mezzo, tenendo conto dell'eventuale *offset* dovuto all'apparato sperimentale (nel nostro caso evidentemente presente<sup>10</sup>). La relativa stima dei parametri è  $a = 1.023 \pm 0.005$  V,  $b = 0.192 \pm 0.002$ ,  $c = -0.131 \pm 0.002$  V con un chi quadro ridotto  $\chi^2/\nu = 14.6/16$  e matrice di covarianza<sup>11</sup>  $10^{-6} \cdot \begin{pmatrix} 26 & 3.6 & 0.77 \\ 3.6 & 3.0 & 2.8 \\ 0.77 & 2.8 & 3.4 \end{pmatrix}$ . I dati sono riportati, congiuntamente alla funzione di *fit*, in figura 13.

Dal valore di  $b$ , sapendo che le piastrine hanno spessore  $150 \mu\text{m}$ <sup>12</sup>, si ricava per il coefficiente di assorbimento del *mylar*:

$$\alpha_{mylar} = 1.28 \pm 0.01 \text{ mm}^{-1}$$

L'incertezza sul coefficiente di assorbimento potrebbe non essere attendibile perchè non conosciamo l'origine dell'offset sul segnale in uscita e la sua dipendenza dalla tensione. Se infatti questa non è costante potrebbe avere diminuito l'accuratezza delle nostre misure.

## Note finali

Si è visto che, sia  $S_6$ , sia  $V_{voltmetro}$ , presentano un *offset* di circa 130 mV. Eventuali non idealità del funzionamento degli OpAmp non sono in grado di spiegare *offset* superiori a qualche decina di mV; inoltre, l'offset relativo a  $V_{voltmetro}$  non è dovuto a quello presente su  $S_6$  (confronta la figura 14). L'unica spiegazione che si è riusciti a fornire è che ci fosse un malfunzionamento degli OpAmp, forse dovuto a una cattiva alimentazione (i due OpAmp erano collegati alla stessa linea da -5 V).

<sup>10</sup>Per un tentativo di spiegazione di tale fenomeno, si vedano le note conclusive.

<sup>11</sup>Si sottintendono le unità di misura.

<sup>12</sup>Si trascura la relativa incertezza rispetto a quelle introdotte dal nostro metodo di misura.



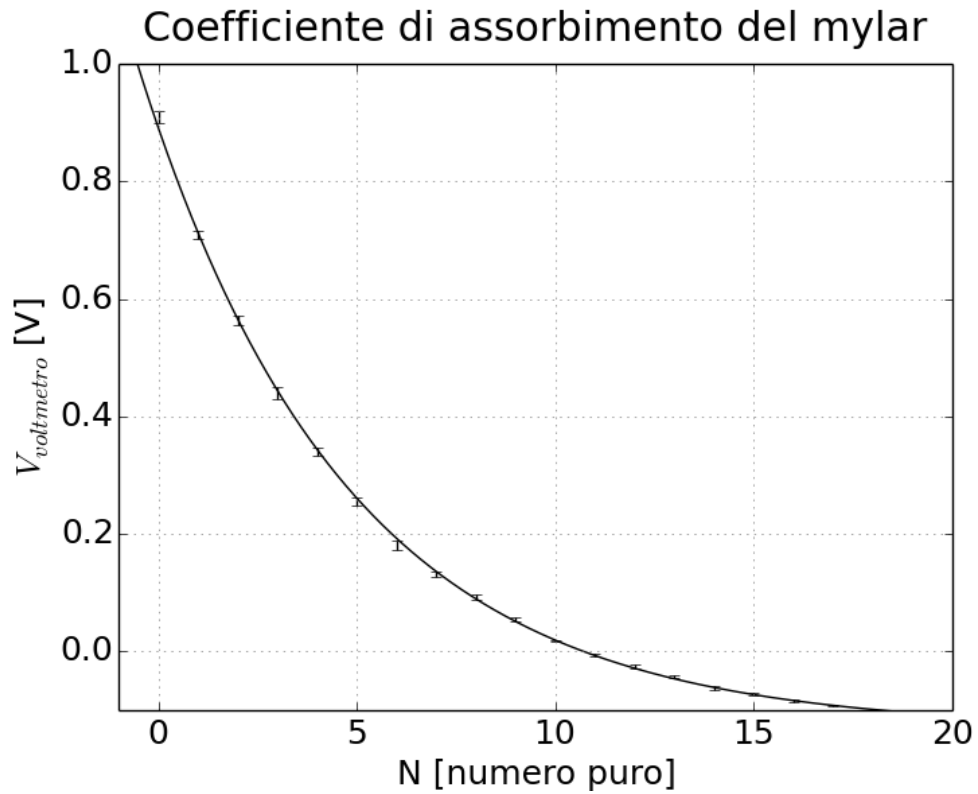


Figura 13: Tensione in ingresso al voltmetro in funzione del numero di piastrelle di *mylar* interposte tra il LED e il fotodiodo; il sovrapposizione il *fit* eseguito con la funzione 1.

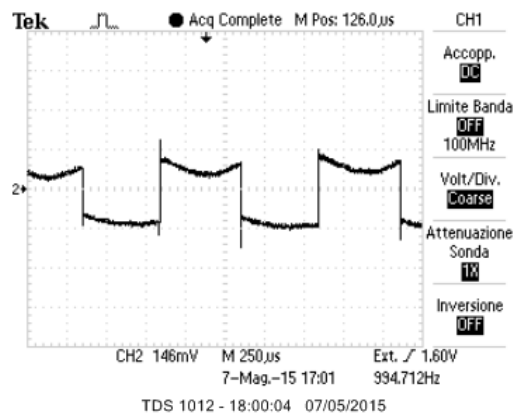


Figura 14: Uscita  $S_9$  per un numero alto di piastrelle; l'*offset* è in media inferiore, in valore assoluto, a 40 mV.