

Esercitazione 14 - Gruppo AD

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

Alessandro Podo

Federica Maria Surace

4 maggio 2015

Lo scopo dell'esperienza è quello di misurare l'assorbimento di luce visibile (rossa) da parte di alcune lastre di Mylar utilizzando un amplificatore sincrono sensibile alla fase (lock-in) per isolare il segnale dal rumore.

1 Metodo di misura e schema a blocchi

Si è interessati a misurare il coefficiente di assorbimento del Mylar. Per effettuare la misura si utilizzano delle lastre di Mylar con uno spessore di $150\text{ }\mu\text{m}$. Tali lastre vengono interposte tra un LED rosso e un fotodiodo; la tensione in uscita dal circuito dipende in modo esponenzialmente decrescente dal numero di lastre interposte e la misura della costante di decadimento permette di determinare il coefficiente di assorbimento.

Poiché il segnale che si vuole misurare è molto debole, la misura prevede una serie di tecniche ed accorgimenti che servono ad isolare il segnale dal rumore. Per limitare il rumore $1/f$, che diventa dominante a basse frequenze, si utilizza un segnale sinusoidale di frequenza 1 kHz per modulare l'accensione del LED. Questo segnale viene amplificato attraverso un amplificatore di potenza prima di essere fornito al LED. Il segnale in uscita dal fotodiodo è una sinusoide con la stessa frequenza e in fase con il segnale di modulazione¹. Per pulire questo segnale dal rumore a frequenze diverse da 1 kHz si usa un lock-in. Lo sfasatore di $\pi/2$, lo sfasatore a fase variabile e lo squadratore servono a generare e calibrare un'onda quadra con duty cycle 50% in fase con il segnale di modulazione. Il segnale in uscita dal fotodiodo viene campionato separando la parte positiva e la parte negativa del segnale; per fare questo si usa un campionatore che riceve l'onda quadra e fornisce due uscite con la semionda positiva e quella negativa. Queste uscite vengono sommate utilizzando l'amplificatore differenziale (la parte negativa viene anche invertita). Facendo la media dell'onda finale per mezzo di un filtro passa basso si ottiene un segnale costante diverso da zero. Questo segnale comprende soltanto la componente a frequenza 1 kHz che è stata campionata e resa positiva; tutte le componenti a frequenza diversa, non essendo state rettificate, hanno media nulla. In questo modo si è eliminato gran parte del rumore, migliorando la sensibilità della misura.

Lo schema dell'apparato di misura realizzato è quello riportato in figura 1.

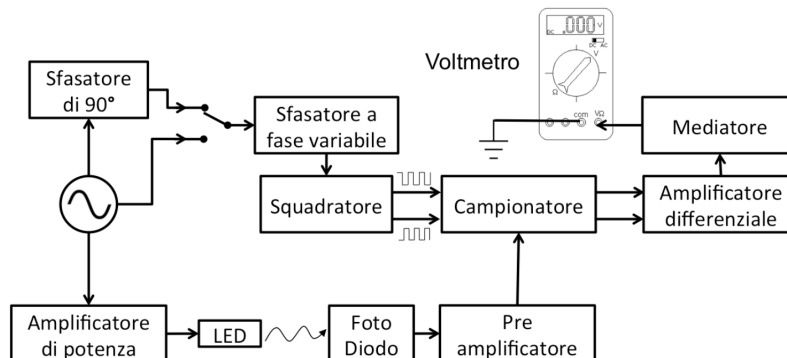


Figura 1: Schema a blocchi dell'apparato di misura.

¹I tempi di propagazione sono trascurabili. Infatti, il periodo del segnale di modulazione è di 1 ms mentre i tempi di propagazione sono dell'ordine delle decine di nano secondi.

2 Implementazione dei blocchi del circuito

Amplificatore di potenza, preamplificatore e misura preliminare della costante di assorbimento

Si è montato il circuito in figura 2 usando come tensioni di alimentazione $V_{EE} = -4.87 \pm 0.01$ V e $V_{CC} = 4.95 \pm 0.01$ V. In S1 si è inviato un segnale di frequenza $f = 1.00 \pm 0.01$ kHz e ampiezza picco-picco $V_{pp} = 6.04 \pm 0.04$ V.

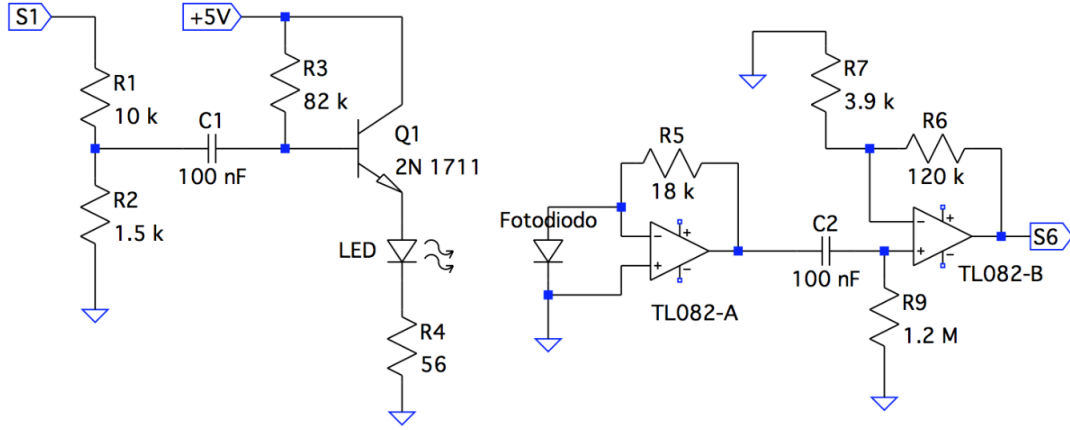
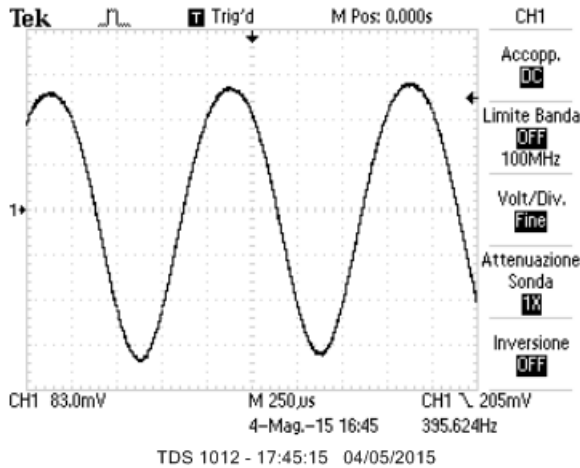
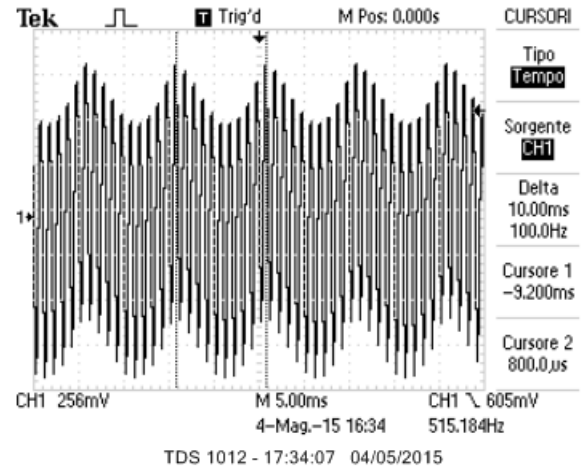


Figura 2: Schema circuitale dell'amplificatore di potenza e del preamplificatore.

Come atteso, il LED risulta acceso e all'uscita S6 si ha un segnale sinusoidale di frequenza $f = 1.00 \pm 0.01$ kHz. Tale segnale risulta piuttosto rumoroso (figura 3). In particolare si ha rumore a 100 Hz con un'ampiezza di circa 0.25 V. Coprendo il fotodiodo in modo da schermarlo dalla luce ambientale è possibile limitare questo rumore; in particolare tutte le misure, con l'esclusione della stima del rumore, sono state eseguite isolando il fotodiodo dalla luce ambientale. Si è misurata l'ampiezza del segnale in S6 in funzione del numero di lastre di Mylar interposte tra il LED e il fotodiodo. Le misure sono riportate in tabella 1.



(a) Segnale con 5 lastre di Mylar, isolando il LED dal rumore ambientale



(b) Rumore a 100 Hz

Figura 3: Segnale all'uscita S6

Come atteso l'ampiezza del segnale diminuisce all'aumentare del numero di lastre.

Supponendo che per ogni lastrina il rapporto fra intensità incidente e intensità trasmessa sia costante, si ha che la dipendenza del segnale da n è esponenziale:

$$V = V_0 e^{-n/n_0}$$

Tabella 1: Ampiezza del segnale S6 in funzione del numero di lastre (n) di Mylar interposte tra il LED e il fotodiodo.

n	V_6 [V]
0	1.47 ± 0.02
1	1.13 ± 0.02
2	0.92 ± 0.01
3	0.74 ± 0.01
4	0.61 ± 0.01
5	0.50 ± 0.01

Si può quindi ricavare il valore di n_0 tramite un fit lineare di $\ln(V)$. Si è ottenuto $n_0 = 4.7 \pm 0.1$ e $V_0 = 1.43 \pm 0.02$ V. Il valore del χ^2 ridotto è 5.1 (figura 4). Dalla costante di decadimento si può ricavare la *lunghezza di assorbimento*²: sapendo che una lastra è spessa $150\mu\text{m}$ si ottiene $x_0 = 0.71 \pm 0.02$ mm.

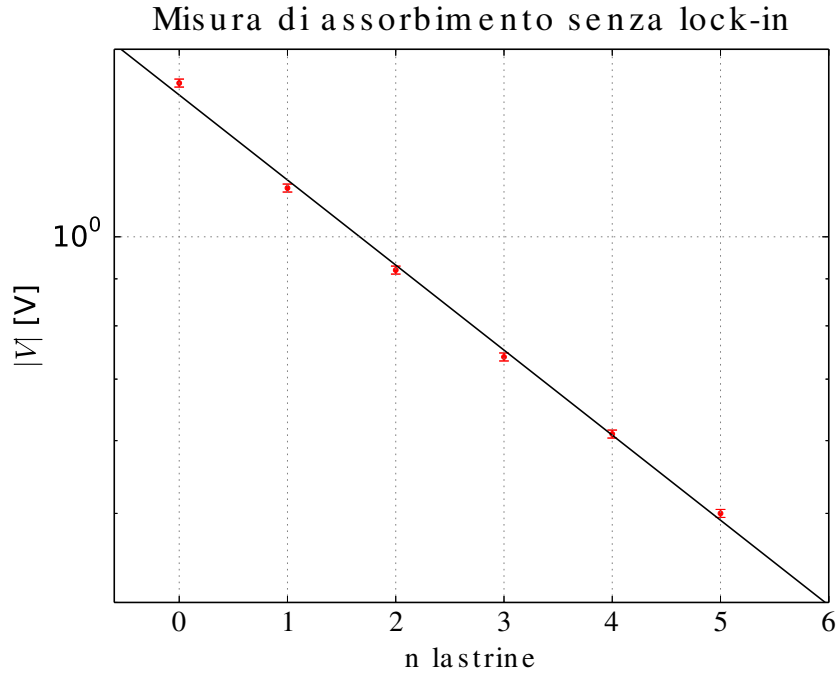


Figura 4: Ampiezza del segnale misurato in funzione del numero di lastre in scala semilogaritmica.

Sfasatore di 90 gradi, sfasatore a fase variabile e squadratore

Si è montato il circuito in figura 5, fornendo in S1 lo stesso segnale fornito all'amplificatore di potenza descritto nella sezione precedente.

In S2 si osserva un'onda sinusoidale sfasata rispetto a S1 e con la stessa frequenza. Si è regolato il trimmer P1 in modo che lo sfasamento tra i segnali S1 ed S2 fosse 90 gradi (figura 7). In seguito si è osservato il segnale in S3 verificando che fosse un'onda quadra. Si è regolato il trimmer P3 in modo che il duty cycle dell'onda fosse 50%³. Agendo sul deviatore, l'onda in S3 viene sfasata di 90 gradi (figura 6). Infine si è verificato che agendo sul trimmer P2 è possibile regolare lo sfasamento tra i segnali S3 ed S1. In particolare tale sfasamento può essere regolato entro un intervallo di ampiezza $\Delta\phi = 0.872 \pm 0.009 \pi$ rad.

²L'intensità della radiazione in funzione dello spessore di Mylar attraversato è $I = I_0 e^{-x/x_0}$, in cui si definisce x_0 lunghezza di assorbimento.

³Si sono misurati i tempi t_{up} e t_{down} in cui l'onda assume il valore alto/basso. Si ha $t_{up} = t_{down} = 498 \pm 5 \mu\text{s}$.

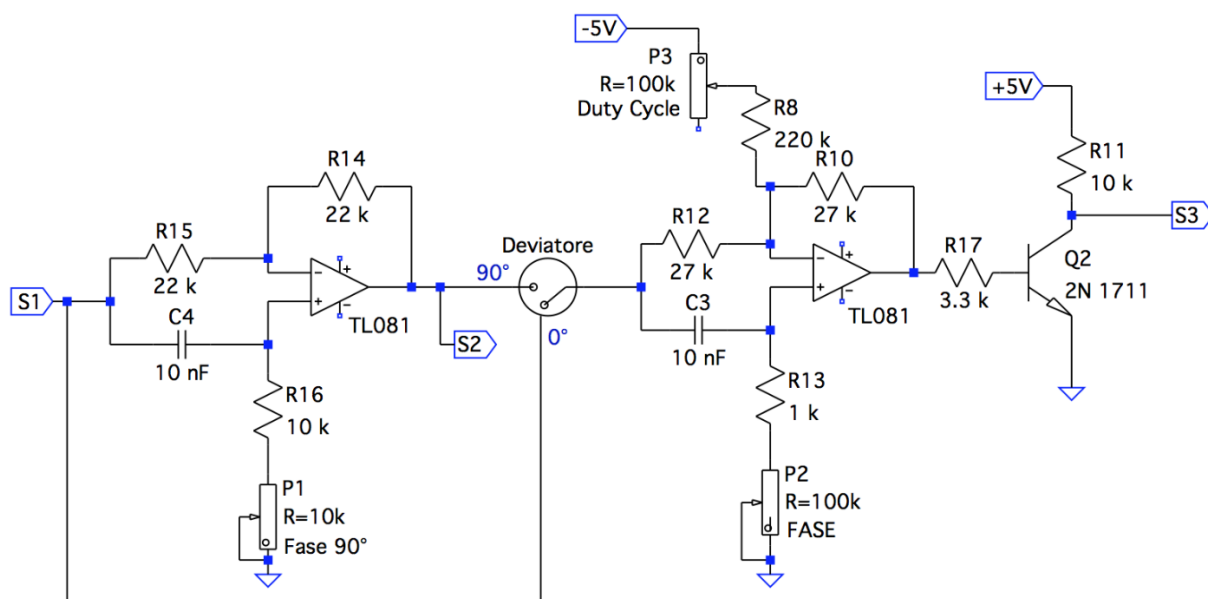


Figura 5: Schema circuitale dell'amplificatore di potenza e del preamplificatore.

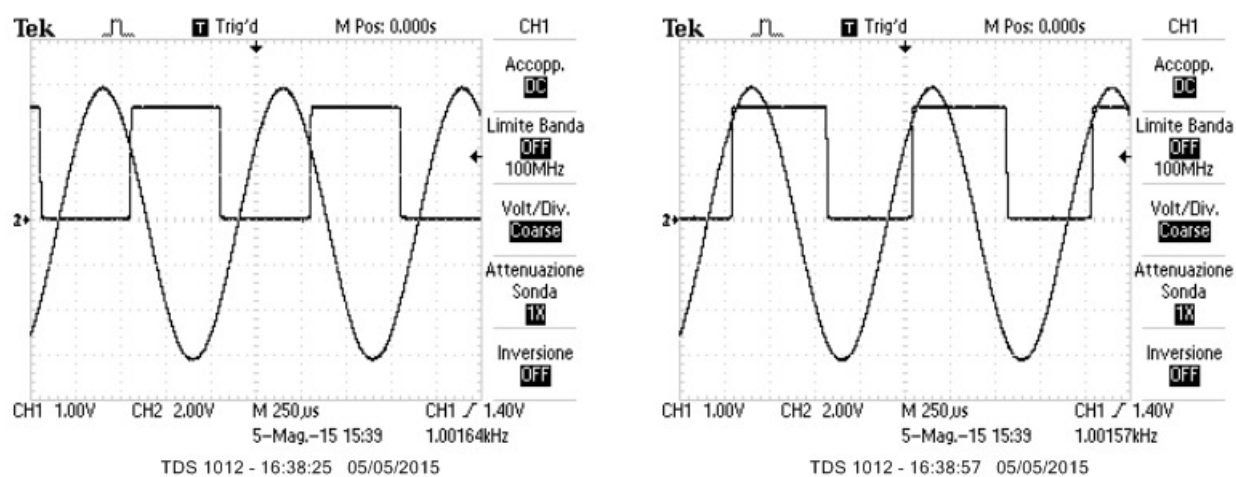


Figura 6: Segnale S3 in uscita dallo squadratore con e senza deviatore.

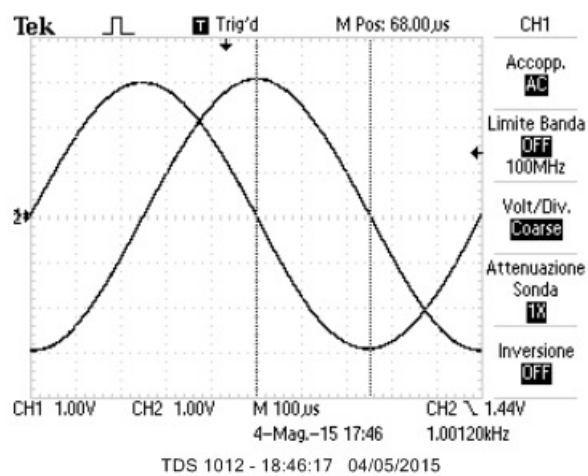


Figura 7: Segnali S1 ed S2, sfasati di 90 gradi.

Squadratore e campionatore

Lo squadratore e il campionatore sono stati montati come in figura 8. L'onda in uscita dallo sfasatore (S3) viene mandata ai due NOT (U1 e U2) in modo da ripulire il segnale. Il segnale ottenuto (S4) e il suo negato (S5) vengono mandati al campionatore e servono a selezionare alternativamente il canale su cui mandare in uscita l'onda S6. In figura 9 sono riportate le onde S4 e S5, mentre in figura 10 si osservano le uscite del campionatore S7 e S8 nelle due posizioni del deviatore.

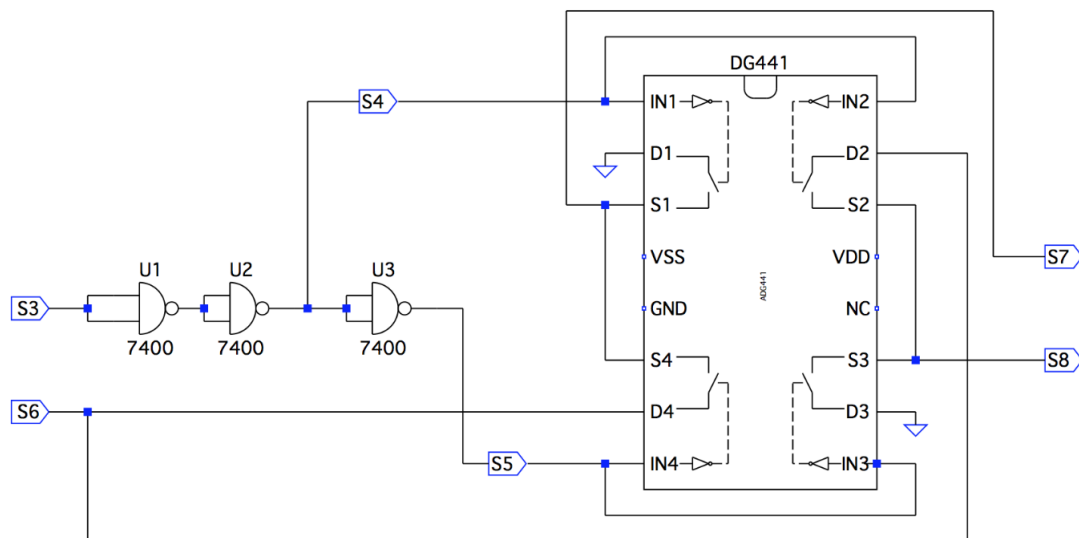


Figura 8: Squadratore e campionatore

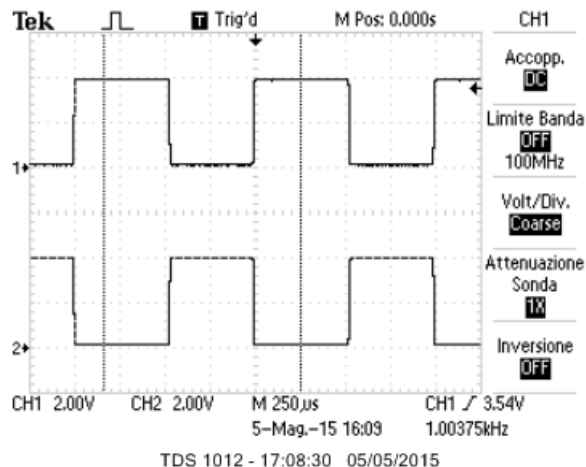
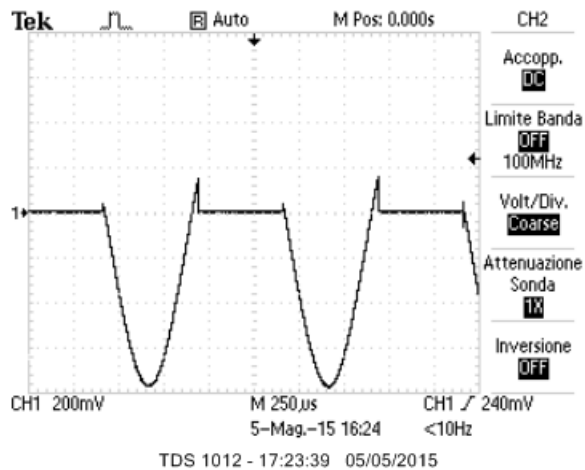


Figura 9: S4 e S5

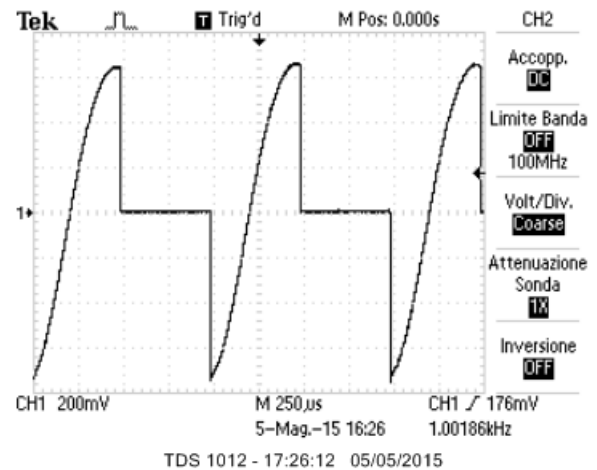
Amplificatore differenziale e mediatore

L'amplificatore differenziale e il mediatore sono stati montati come in figura 11. Le onde S7 e S8 vengono sommate (con S8 invertita) dall'amplificatore differenziale, successivamente il mediatore (che si comporta da filtro passa-basso) fornisce in continua il valor medio dell'onda risultante. Il potenziometro dello sfasatore a fase variabile è regolato in modo che il segnale abbia segno costante in una delle due posizioni del deviatore (nel nostro caso con il deviatore a 90 gradi) e media 0 nell'altra (figura 12).

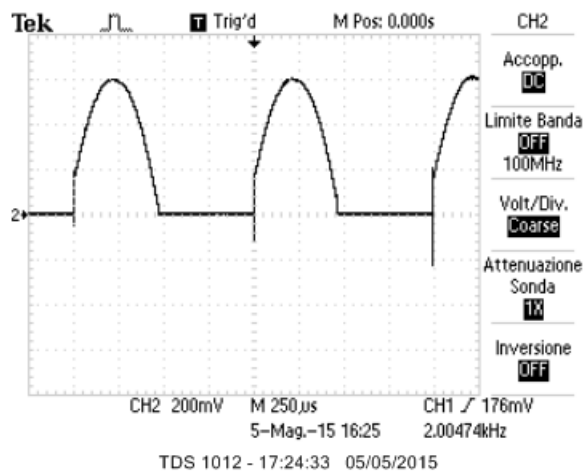
Una volta posizionato il deviatore a 90 gradi, si misura tramite il voltmetro il valore medio della tensione. Come si osserva in figura 13, il segnale all'uscita del mediatore è effettivamente costante.



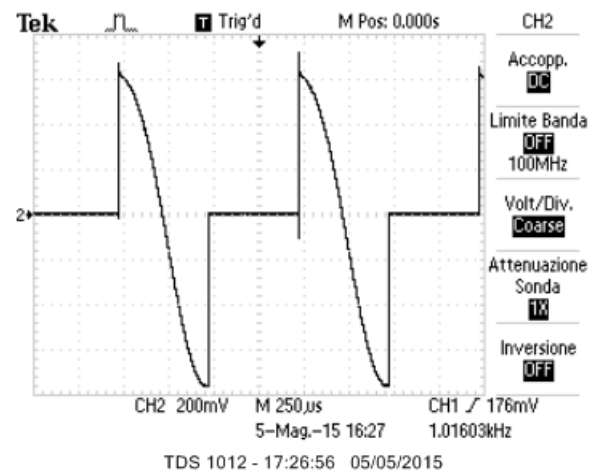
(a) S7, deviatore 0 gradi



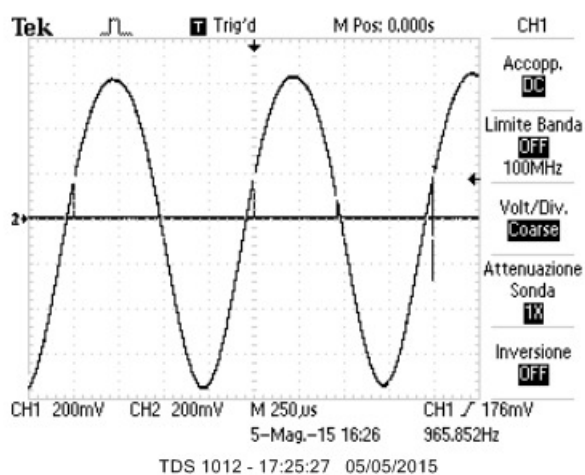
(b) S7, deviatore 90 gradi



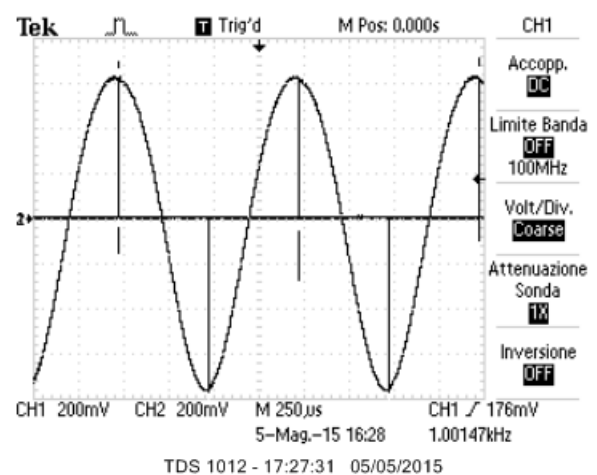
(c) S8, deviatore 0 gradi



(d) S8 deviatore 90 gradi



(e) S7 e S8, deviatore 0 gradi



(f) S7 e S8, deviatore 90 gradi

Figura 10: Le schermate (a), (c), (e) si riferiscono al caso in cui il deviatore sia posto a 0 gradi, le schermate (b), (d), (f) si riferiscono invece al deviatore a 90 gradi. S7 e S8 coincidono con S6 quando S3 è rispettivamente alto/basso, valgono 0 nell'altro caso.

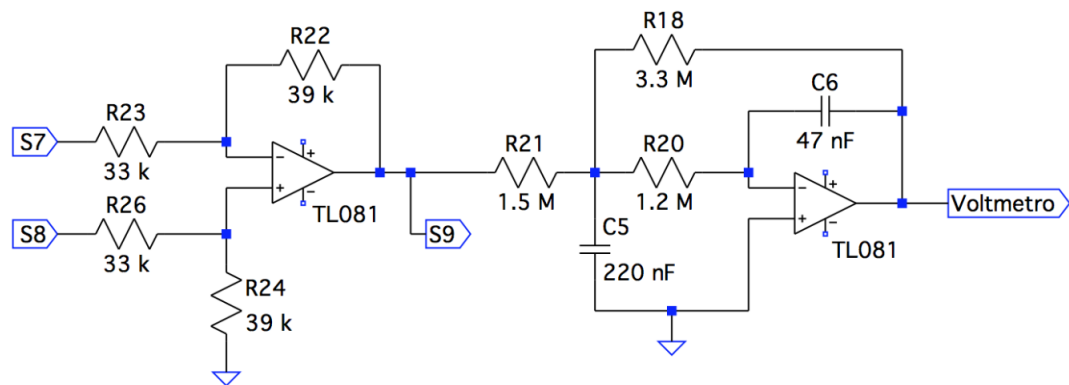
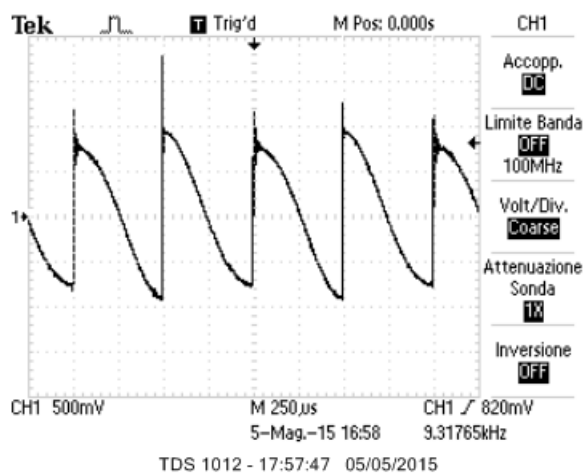
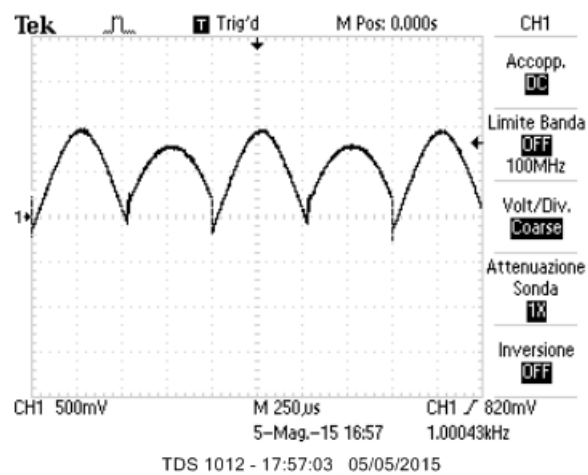


Figura 11: Amplificatore differenziale e mediatore.



(a) S9, deviatore 0 gradi



(b) S9, deviatore 90 gradi

Figura 12: Le schermate (a) e (b) mostrano rispettivamente il segnale a media nulla e quello a segno costante.

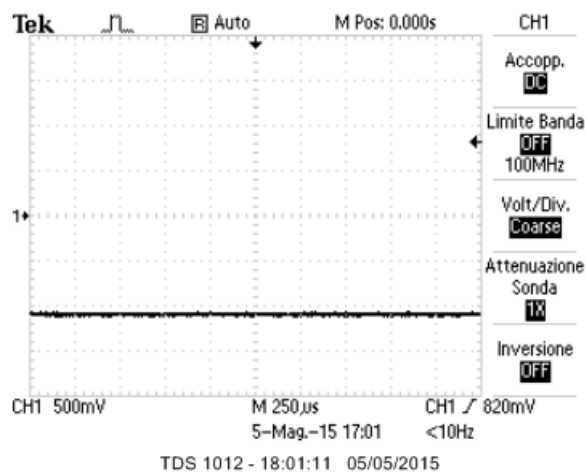


Figura 13: Segnale all'uscita del mediatore

3 Misura dell'assorbimento tramite il lock-in

L'amplificatore lock-in realizzato è stato usato per la misura dell'assorbimento di alcune lastrine di Mylar. In tabella 2 riportiamo il valore misurato dal voltmetro (proporzionale all'intensità della luce ricevuta dal fotodiodo) in funzione del numero di lastrine interposte fra il LED rosso e il fotodiodo.

Tabella 2: Misura dell'assorbimento tramite il lock-in

n	$V[V] \pm 1\%$
0	-1.10
1	-0.881
2	-0.714
3	-0.569
4	-0.461
5	-0.374
6	-0.296
7	-0.235
8	-0.190
9	-0.154
10	-0.125
11	-0.104
12	-0.0863
13	-0.0637

L'errore sui voltaggi è stato stimato con l'1% in quanto tra l'inizio e la fine delle misure il valore misurato dal voltmetro in assenza di lastrine si era ridotto di circa l'1%.

Poichè vale la relazione

$$V = V_0 e^{-n/n_0}$$

si è effettuato un fit analogo a quello descritto in precedenza (figura 4). Si è ottenuto $n_0 = 4.61 \pm 0.03$ e $V_0 = 1.095 \pm 0.008V$. La retta di fit è mostrata in figura 14. Il valore del χ^2 ridotto è 2.1.

Come nella misura precedente, si può ricavare la *lunghezza di assorbimento* per la luce rossa: $x_0 = 0.692 \pm 0.005 \text{ ms}^4$.

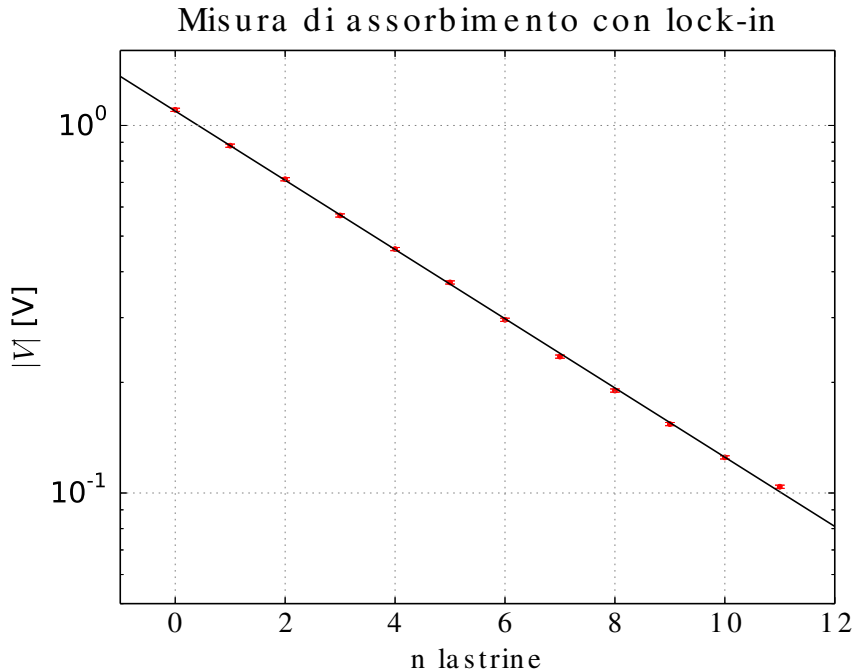


Figura 14: Ampiezza del segnale misurato in funzione del numero di lastrine in scala semilogaritmica.

⁴Nella stima dell'errore non si è tenuto conto dell'incertezza (dato non disponibile) sullo spessore delle lastrine.

Confrontando i valori qui ottenuti con quelli ricavati nella misura in assenza di lock-in (tabella 3), si verifica che sono compatibili all'interno dell'errore, tuttavia l'impiego del lock-in permette di avere una misura più accurata. Inoltre, si è verificato che i valori misurati utilizzando il lock-in sono immuni alla luce ambientale: infatti, coprendo il fotodiodo in modo che non riceva la luce esterna, la tensione misurata non cambia.

Tabella 3: Confronto tra le misure con e senza lock-in

	n_0	x_0 [mm]	χ^2_{rid}
Misura senza lock-in	4.7 ± 0.1	0.71 ± 0.02	5.1
Misura con lock-in	4.61 ± 0.03	0.692 ± 0.005	2.1