

Esercitazione di Laboratorio:

Circuiti con diodi

Coa Giulio

Licastro Dario

Montano Alessandra

21 dicembre 2019

1 Scopo dell'esperienza

Lo scopo di questa esercitazione è analizzare vari circuiti contenenti diodi, tramite l'esecuzione di una serie di misure al fine di determinare la caratteristica statica $I_d(V_d)$ dei suddetti diodi, e la successiva visualizzazione del loro comportamento con una tensione d'ingresso di tipo sinusoidale.

2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione usata durante l'esercitazione è:

Strumento	Marca e Modello	Caratteristiche
Multimetro Oscilloscopio	Agilent 34401A Rigol DS1054Z	4 canali, $B = 50 \text{ MHz}$, $f_c = 1 \text{ G} \frac{\text{Sa}}{\text{s}}$, $R_i = 1 \text{ M}\Omega$, $C_i = 13 \text{ pF}$, 12 Mbps di profondità di memoria
Generatore di segnali	Rigol DG1022	2 canali, $f_{\text{uscita}} = 20 \text{ MHz}$, $Z_{\text{uscita}} = 50 \Omega$
Alimentatore in DC	Rigol DP832	2 canali, $f_{\text{uscita}} = 20 \text{ MHz}$, $Z_{\text{uscita}} = 50 \Omega$
Sonda	Rigol PVP215	$B = 35 \text{ MHz}$, $V_{\text{nominale}} = 300 \text{ V}$, $L_{\text{cavo}} = 1.2 \text{ m}$, $R_s = 1 \text{ M}\Omega$, Intervallo di compensazione: $10 \div 25 \text{ pF}$ Capacità dell'ordine dei $80 \div 100 \text{ p} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
Cavi coassiali Connettori Breadboard Resistenza		$R = 9.9 \text{ k}\Omega$
Diodo di Zener Diodo	1N5228 1N4148	
Condensatori		$C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$, $C_3 = 1 \mu\text{F}$

3 Premesse teoriche

3.1 Incertezza sulla misura dell'oscilloscopio

La misura del valore di un segnale tramite l'oscilloscopio (sia esso l'ampiezza, la frequenza, il periodo, etc.) presenta un'incertezza che dipende, principalmente, da due fattori:

- l'incertezza strumentale introdotta dall'oscilloscopio (ricavabile dal manuale).
- l'incertezza di lettura dovuta all'errore del posizionamento dei cursori.

Quest'ultima incertezza deriva dal fatto che il segnale visualizzato non ha uno spessore nullo sullo schermo.

3.2 Sonda

La sonda è un particolare cavo coassiale che presenta un'estremità capace di effettuare delle misurazioni.

Quando si usano dei classici cavi coassiali BNC-BNC al fine di collegare il circuito, su cui effettuare le misure, all'oscilloscopio, si sta inserendo in parallelo al circuito un condensatore di capacità (C_c) pari a quella del cavo.

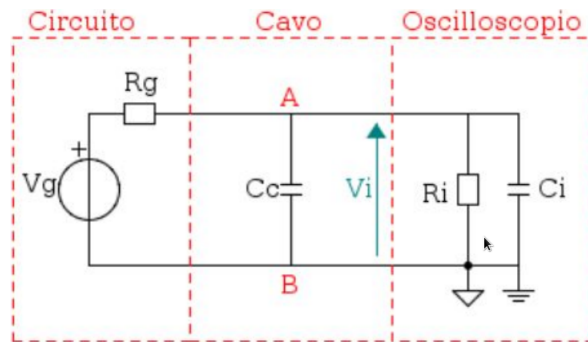


Figura 1: Circuito analizzato collegato all'oscilloscopio tramite un cavo coassiale BNC-BNC.

In questo caso, l'oscilloscopio si comporta, in ingresso, come un filtro passa-basso con una frequenza di taglio ($f = \frac{1}{2\pi R_i(C_s + C_i)}$). L'uso di una sonda per misurare delle grandezze in un circuito, si può vedere come l'inserimento di un condensatore in serie al circuito.

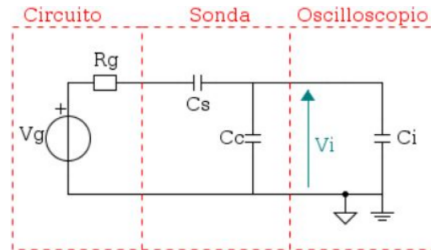


Figura 2: Circuito analizzato collegato all'oscilloscopio tramite una sonda.

L'introduzione di questo condensatore comporta un calo della capacità equivalente vista all'ingresso del circuito ($\frac{C_s(C_c+C_i)}{C_s+C_c+C_i} \ll C_c + C_i$), ovvero una riduzione della frequenza del polo ($f_{\text{polo}} = \frac{1}{2\pi R_i(C_s+C_i)}$); ciò porta ad una perdita d'informazioni in bassa frequenza. Al fine di evitare tale perdita d'informazioni, si pone, in parallelo al condensatore, una resistenza.

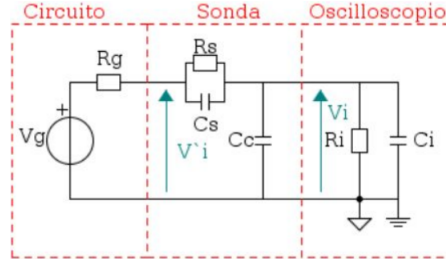


Figura 3: Circuito analizzato collegato all'oscilloscopio tramite una sonda.

Tale resistenza comporta la presenza di uno zero, oltre al polo precedentemente detto.

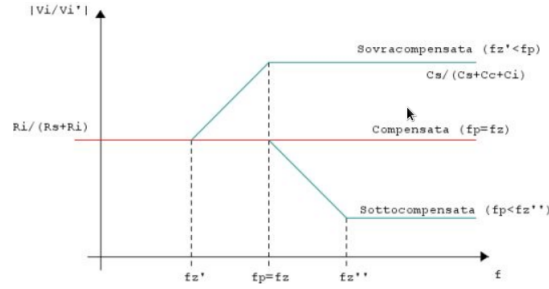


Figura 4: Diagramma di Bode della funzione di trasferimento del circuito.

A seconda dell'elevata o della bassa compensazione della sonda, il segnale sarà distorto verso l'alto o verso il basso.

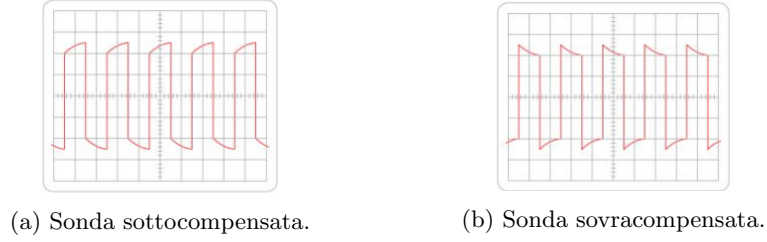


Figura 5: Visualizzazione del segnale al variare della compensazione della sonda.

La sonda risulta compensata quando la frequenza del polo coincide con la frequenza dello zero; ciò avviene quando $R_s C_s = R_i (C_c + C_i)$. La sonda presenta un opportuno trimmer che influenza il valore di R_s e permette la compensazione. Al fine di verificare se la sonda è compensata si esegue un confronto con un segnale noto.

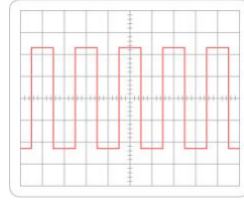


Figura 6: Sonda compensata.

3.3 Diodo

Il diodo è un bipolo non lineare il cui comportamento è descritto dalle due seguenti espressioni analitiche equivalenti tra loro

$$i_D = I_S \cdot (e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1)$$

$$v_D = \eta \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{i_D}{I_S} + 1\right)$$

dove V_T è la tensione termica del diodo ($V_T = \frac{k \cdot T}{q}$), I_S è la corrente di saturazione ed η è il fattore di non idealità.

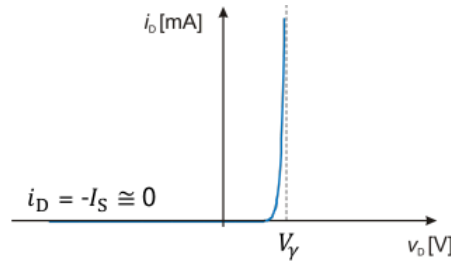


Figura 7: Caratteristica statica di un diodo.

Si noti come, al crescere di v_D , la corrente i_D , ovvero la corrente che attraversa il diodo, aumenti (regione di polarizzazione); in particolare, dopo il raggiungimento della tensione di soglia V_γ , il diodo tende a comportarsi come un generatore ideale indipendente di tensione di valore pari a V_γ .

Al contrario, quando v_D è troppo bassa, la corrente i_D è pari a $-I_S$, ovvero circa nulla; ciò porta il diodo a comportarsi similmente ad un circuito aperto (regione di polarizzazione inversa). Questa condizione può dare luogo al fenomeno del breakdown, ovvero quando il diodo conduce in direzione opposta; tale fenomeno porta, solitamente, alla rottura del diodo.

3.3.1 Diodo di Zener

Sono particolari tipi di diodi progettati appositamente per lavorare anche in polarizzazione inversa; questi diodi non si rompono se si verifica il breakdown, anzi sono caratterizzati da una tensione di soglia negativa, detta, per l'appunto, tensione di breakdown.

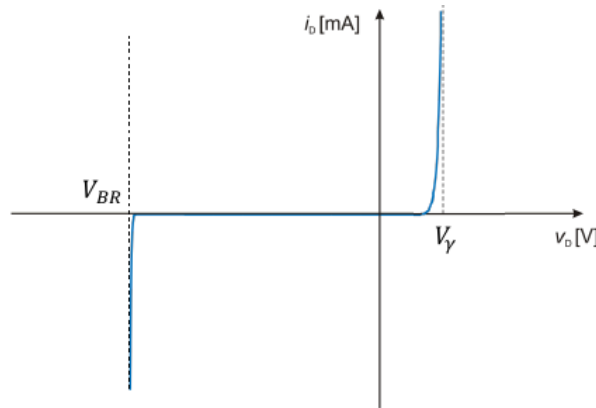


Figura 8: Caratteristica statica di un diodo di Zener.

3.4 Raddrizzatore a semplice semionda

Il raddrizzatore a semplice semionda è un circuito che, data una tensione in input, caratterizzata da un valor medio non nullo, ne estrae la parte positiva; il segnale in uscita presenta valor medio nullo.

$$v_{\text{out}} = \begin{cases} v_{\text{in}} & v_{\text{in}} > 0 \\ 0 & v_{\text{in}} \leq 0 \end{cases}$$

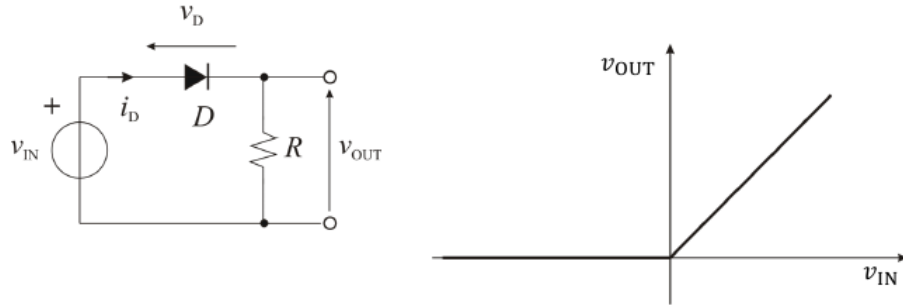


Figura 9: Circuito e transcaratteristica statica di un raddrizzatore a semplice semionda.

3.5 Rivelatore di picco

Il rivelatore di picco è un circuito che, dato un segnale in ingresso, ne determina il valore di picco.

$$v_{in} = V_p \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

$$v_{out} = V_p$$

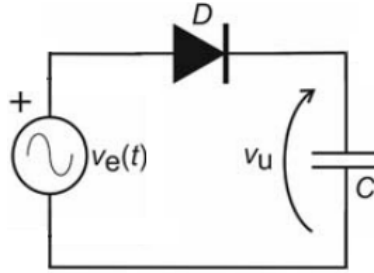


Figura 10: Circuito del rivelatore di picco.

3.6 Protezione ESD

La protezione ESD è un circuito usato come protezione da scariche elettrostatiche, caratterizzato dall'imposizione di una tensione massima e di una tensione minima.

$$v_{out} = \begin{cases} -V_\gamma & v_{in} < -V_\gamma \\ v_{in} & -V_\gamma \leq v_{in} \leq V_{DD} + V_\gamma \\ V_{DD} + V_\gamma & v_{in} > V_{DD} + V_\gamma \end{cases}$$

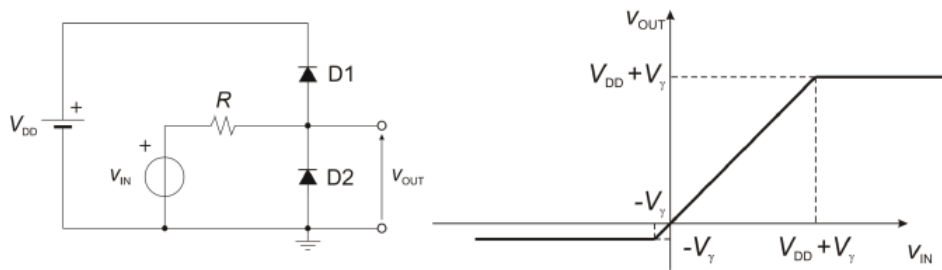


Figura 11: Circuito e transcaratteristica statica di una protezione ESD.

4 Esperienza in laboratorio

4.1 Caratteristiche statiche

Abbiamo montato sulla breadboard la resistenza, il diodo $D=1N4148$ e l'elemento di collegamento seguendo lo schema in figura.

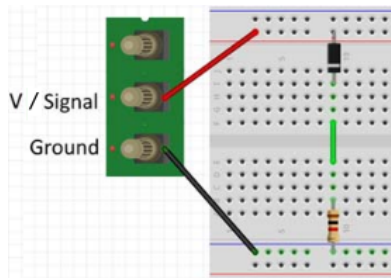


Figura 12: Circuito.

Successivamente, per mezzo del multimetro, abbiamo misurato la resistenza, verificando che tale valore rientri nel 5% di tolleranza dato dal costruttore. Dopo aver alimentato, collegando la breadboard all'alimentatore in DC per mezzo di due cavi a banana, il circuito, abbiamo variato la tensione in ingresso secondo i valori fornitici, misurando, sempre tramite il multimetro, i valori di tensione ai capi della resistenza.

In seguito abbiamo connesso alla breadboard, al posto dell'alimentatore in DC, il generatore di segnali tramite un cavo coassiale BNC-banana, impostandolo per fornire un segnale d'ampiezza $V_{pp} = 10\text{ V}$ e frequenza $f = 1\text{ kHz}$, ed, al posto del multimetro, l'oscilloscopio tramite due sonde. Infine, abbiamo sostituito il diodo con il diodo di Zener $D=1N5228$ e ripetuto l'esperienza.

4.2 Raddrizzatore a semplice semionda

Dopo aver realizzato il circuito richiesto, collegando un condensatore in parallelo al circuito e sostituendo il diodo di Zener con il diodo usato precedentemente, si è proceduto col misurare l'ampiezza V_{pp} del segnale al variare della capacità del condensatore.

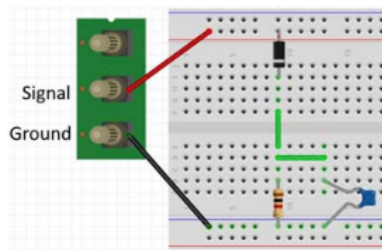


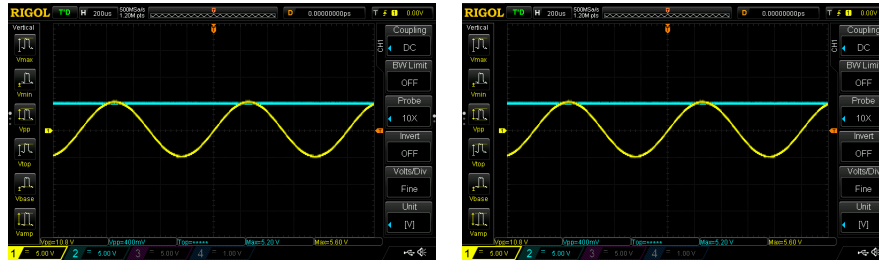
Figura 13: Circuito.

In questo modo, si è potuto apprezzare come la capacità del condensatore influenzi il segnale in uscita; infine, si è sostituito il diodo con il diodo di Zener e ripetuto l'esperienza.

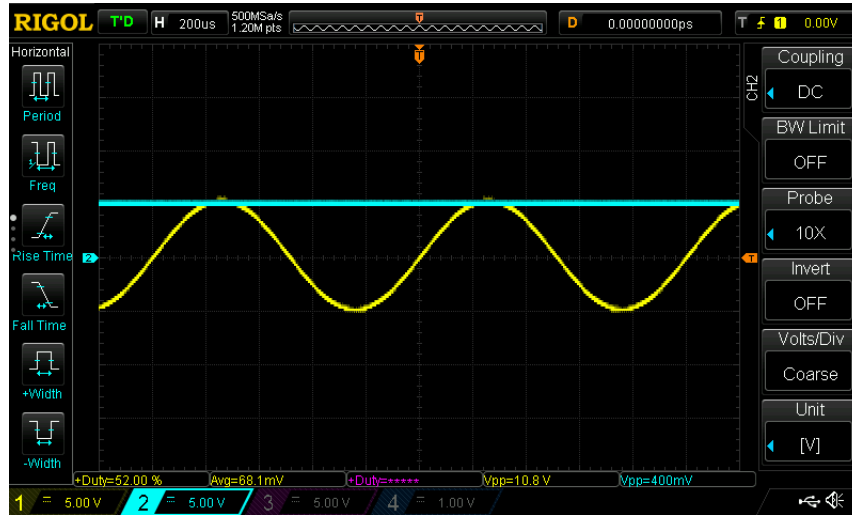
4.3 Rivelatore di picco

Abbiamo posizionato gli elementi circuitali sulla breadboard in modo da costruire il rivelatore di picco, connettendo, tramite due sonde, l'ingresso e l'uscita all'oscilloscopio ed abbiamo impostato il generatore di segnali di modo da visualizzare un segnale sinusoidale d'ampiezza $V_{pp} = 10\text{ V}$ e frequenza $f = 1\text{ kHz}$.

In tal modo, in uscita, visualizziamo un segnale costante sul valore di picco del segnale in ingresso; come si può vedere dalle immagini, tale fenomeno è indipendente dalla capacità del condensatore usato.



(a) Rivelatore di picco con il condensatore da 10 nF. (b) Rivelatore di picco con il condensatore da 100 nF.



(c) Rivelatore di picco con il condensatore da 1 μ F.

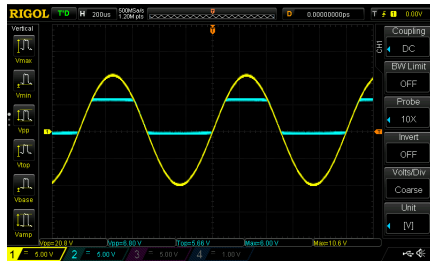
Ciò avviene poichè, una volta alimentato il circuito, il condensatore inizia a caricarsi, raggiungendo il valore di picco del segnale in ingresso; a tal punto, il segnale inizia la "fase di discesa", dove diminuisce la sua ampiezza.

Il diodo, analizzato in condizioni di ampio segnale, si comporta come un circuito aperto per ogni valore di tensione v_D inferiore alla tensione di soglia V_γ ; ciò implica che, quando il segnale diminuisce la sua ampiezza, il diodo smette di condurre corrente in quanto la tensione v_D diventa inferiore alla tensione di soglia.

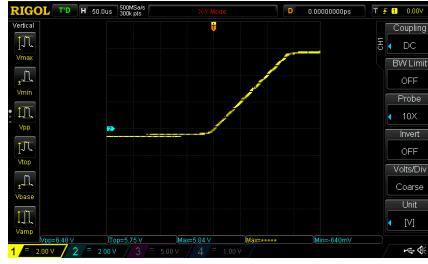
Questo evento comporta l'impossibilità, da parte del condensatore, della fase di scarica, per cui esso preserverà la tensione di picco del segnale in ingresso. Data la non-immediatezza del calo di tensione, esiste un momento in cui il segnale diminuisce la sua ampiezza, ma essa rimane superiore alla tensione di soglia del diodo; in tale momento il condensatore effettua una breve fase di scarica, che porta ad un errore nel funzionamento del circuito, in quanto il valore "memorizzato" non è quello della tensione di picco, ma uno leggermente inferiore.

4.4 Circuito per la protezione da scariche elettrostatiche

Abbiamo posizionato gli elementi circuitali sulla breadboard in modo da costruire la protezione ESD; in questo modo, in uscita, visualizziamo un segnale che presenta i valori di picco limitati, di cui abbiamo determinato V_{\min} e V_{\max} .



(a) Protezione ESD.



(b) Transcaratteristica della protezione ESD.

5 Risultati

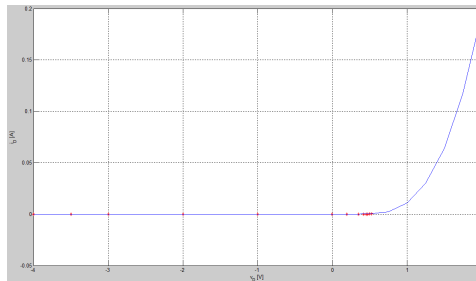
5.1 Caratteristiche statiche

5.1.1 Diodo

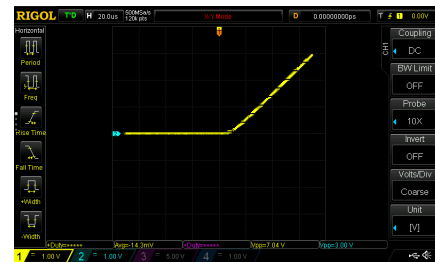
I risultati ottenuti al variare della tensione in ingresso, fornita con l'alimentatore, sono stati riportati nella seguente tabella.

V_e [V]	V_u	I_D
-4	-3.31 mV	-4.65 nA
-3.5	-2.81 mV	-4.34 nA
-3	-2.32 mV	-3.84 nA
-2	-1.33 mV	-3.23 nA
-1	-0.37 mV	-2.73 nA
0	0.006 mV	101 pA
0.2	0.019 mV	209 nA
0.4	0.966 mV	4.58 μ A
0.6	43.5 mV	17.9 μ A
0.8	191 mV	34.7 μ A
1	373 mV	53.1 μ A
1.5	847 mV	101 μ A
2	1.33 V	149 μ A

Si può notare che il diodo utilizzato non è adatto all'uso in polarizzazione inversa, infatti, per valori di V_e negativi, otteniamo valori di V_u molto bassi, che si mantengono intorno allo zero. Come si può intuire dai valori misurati, la tensione di soglia V_γ è pari a 600 mV.



(a) Caratteristica statica del diodo.



(b) Transcaratteristica statica del diodo.

Dopo aver connesso il generatore di segnali, la sonda e l'oscilloscopio come illustrato precedentemente, abbiamo ottenuto la seguente immagine, dove l'output è distorto per effetto del circuito; in particolare, la parte dove il segnale assume valori negativi è stata azzerata e la parte dove il segnale assume valori positivi è stata attenuata a causa della non idealità del diodo.

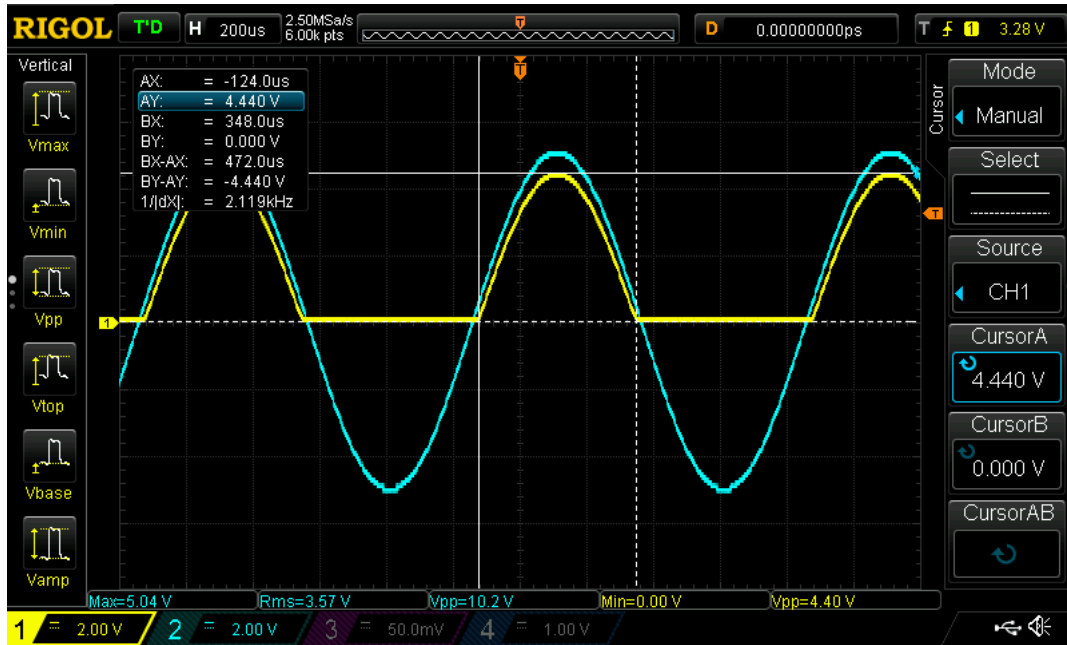


Figura 17: Segnale originale e segnale prelevato a valle del diodo.

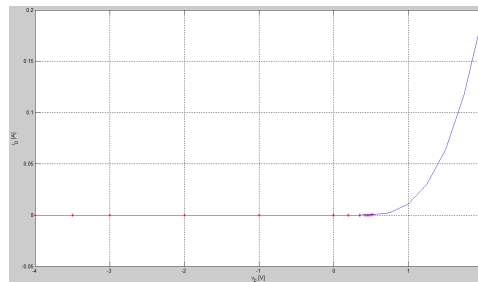
In seguito, abbiamo misurato l'ampiezza di picco del segnale in output, ottenendo 4.40 V.

5.1.2 Diodo di Zener

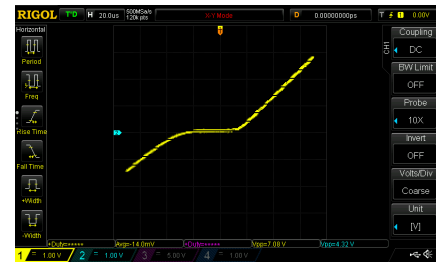
Dopo aver eseguito un'altra volta la procedura utilizzando il diodo di Zener, abbiamo ottenuto dei valori per tensioni negative in input che sono coerenti con la definizione di diodo di Zener.

V_e [V]	V_u	I_D
-4	-3.31 mV	-0.334 μ A
-3.5	-2.81 mV	-0.284 μ A
-3	-2.32 mV	-0.234 μ A
-2	-1.33 mV	-0.134 μ A
-1	-0.37 mV	-37.4 nA
0	0.006 mV	606 pA
0.2	0.019 mV	1.92 nA
0.4	0.966 mV	97.6 nA
0.6	43.5 mV	4.39 μ A
0.8	191 mV	19.2 μ A
1	373 mV	37.7 μ A
1.5	847 mV	85.6 μ A
2	1.33 V	134 μ A

Come si può intuire dai valori misurati, la tensione di soglia V_γ è pari a 600 mV, mentre la tensione di breakdown V_{br} è pari a -1 V.



(a) Caratteristica statica del diodo di Zener.



(b) Transcaratteristica statica del diodo di Zener.

A differenza del diodo usato in precedenza, il diodo di Zener, proprio perchè adatto a lavorare in polarizzazione inversa, conduce anche per valori di tensione negativi, portandoci ad osservare il seguente segnale.

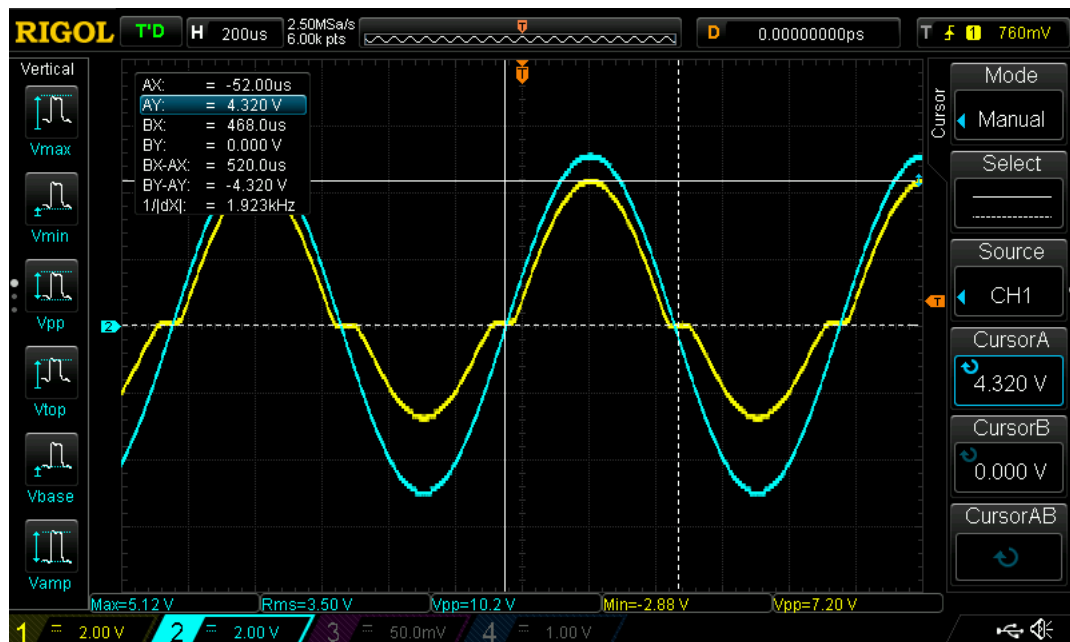


Figura 19: Segnale originale e segnale prelevato a valle del diodo di Zener.

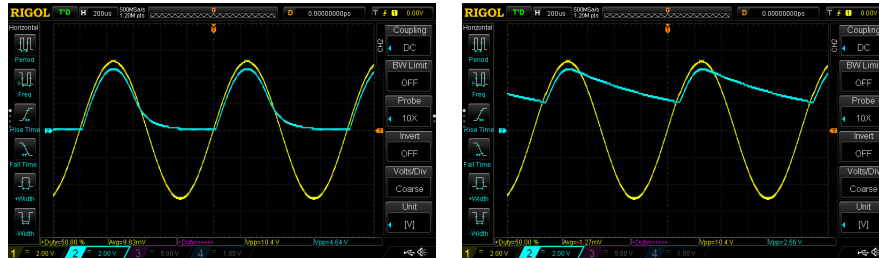
Come fatto in precedenza, abbiamo misurato l'ampiezza di picco del segnale in output, ottenendo 4.32 V.

5.2 Raddrizzatore a semplice semionda

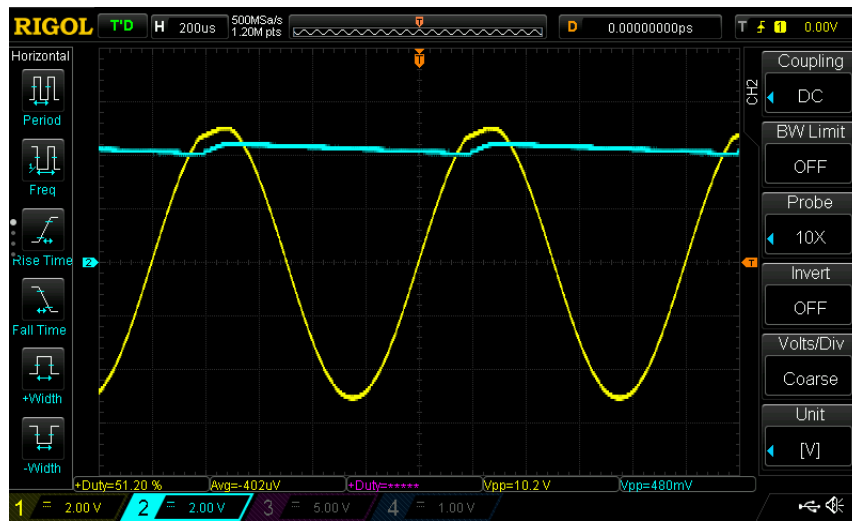
5.2.1 Diodo

Abbiamo costruito il circuito usando i vari condensatori, misurando, ogni volta, l'ampiezza V_{pp} del segnale in output.

C_1	C_2	C_3
4.56 V	2.56 V	480 mV



(a) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 10 nF. (b) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 100 nF.



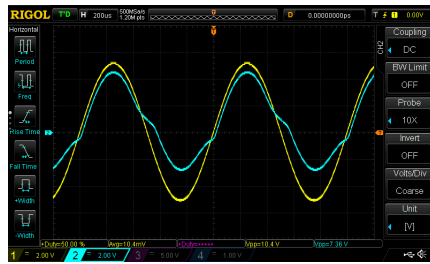
(c) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 1 μ F.

Possiamo notare come, al decrescere della capacità del condensatore, aumenti l'ampiezza V_{pp} del segnale in output, ovvero come il segnale in input viene distorto sempre di più.

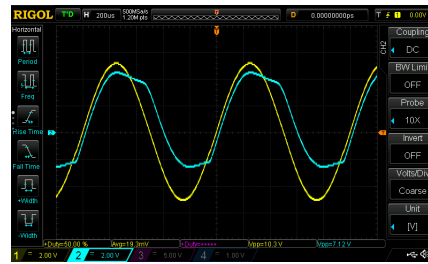
5.2.2 Diodo di Zener

Successivamente, abbiamo sostituito il diodo con il diodo di Zener, ripetendo l'intera esperienza.

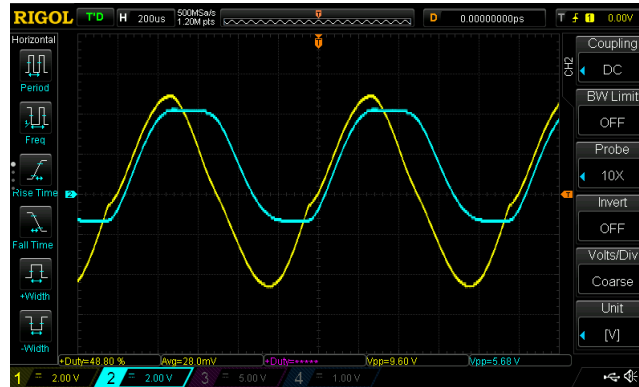
C_1	C_2	C_3
7.36 V	7.12 V	5.68 V



(a) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 10 nF.

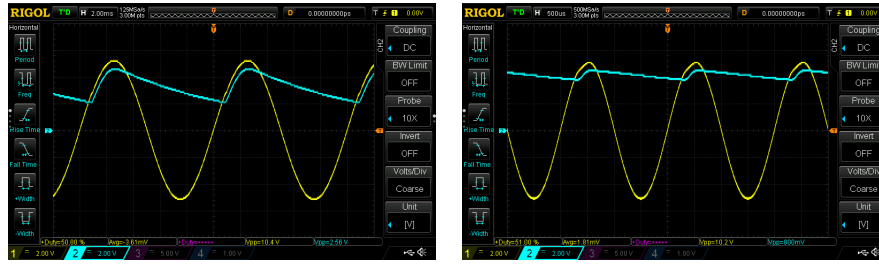


(b) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 100 nF.

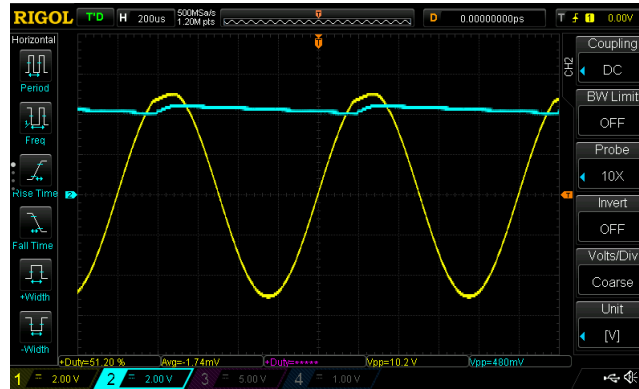


(c) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 1 μ F.

Possiamo notare come, anche in questo caso, al decrescere della capacità del condensatore, aumenti l'ampiezza V_{pp} del segnale in output. Infine abbiamo riposizionato il diodo $D=1N4148$, lasciando montato il condensatore da 1 μ F e connettendo al circuito il generatore di segnali impostato al fine di avere un'ampiezza V_{pp} pari a 10 V, e abbiamo verificato come, al variare della frequenza, variasse l'ampiezza V_{pp} del segnale in output.



(a) Raddrizzatore a semplice semionda (b) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da $1\mu\text{F}$ e con una frequenza di 100 Hz. con il condensatore da $1\mu\text{F}$ e con una frequenza di 500 Hz.



(c) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da $1\mu\text{F}$ e con una frequenza di 1 kHz.

5.3 Circuito per la protezione da scariche elettrostatiche

$$V_{\min} = -600 \text{ mV}$$

$$V_{\max} = 6.00 \text{ V}$$