

Esercitazione di Laboratorio:

Circuiti con diodi

Coa Giulio

Licastro Dario

Montano Alessandra

11 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 in condizioni statiche 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 Diodo di Zener Diodo Condensatori	1N5228 1N4148	$R = 9.9 \text{ k}\Omega$  $C_1 = 10 \text{ nF}$ , $C_2 = 100 \text{ nF}$ , $C_3 = 1 \mu\text{F}$

## 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.

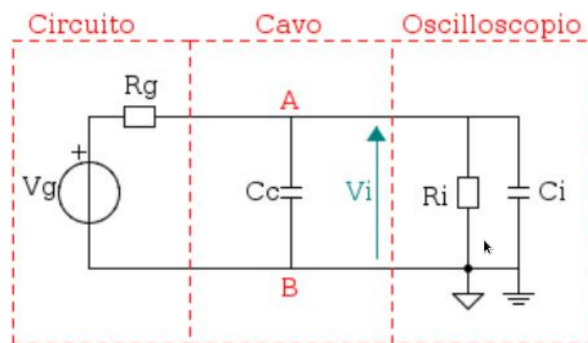


Figura 1: Circuito analizzato collegato all'oscilloscopio tramite un cavo coassiale BNC-BNC.

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.

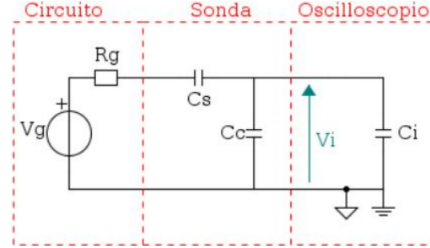


Figura 2: Circuito analizzato collegato all'oscilloscopio tramite una sonda.

L'introduzione di questo condensatore comporta un calo della capacità equivalenti 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.

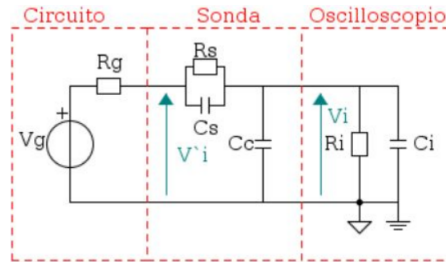


Figura 3: Circuito analizzato collegato all'oscilloscopio tramite una sonda.

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

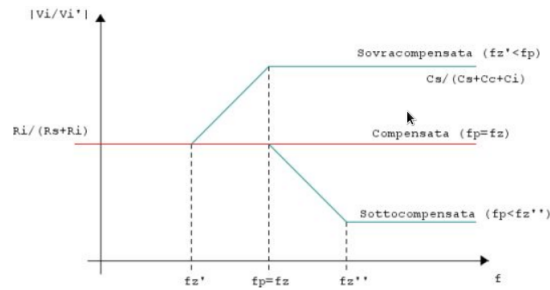


Figura 4: Diagramma di Bode della funzione di trasferimento del circuito.

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

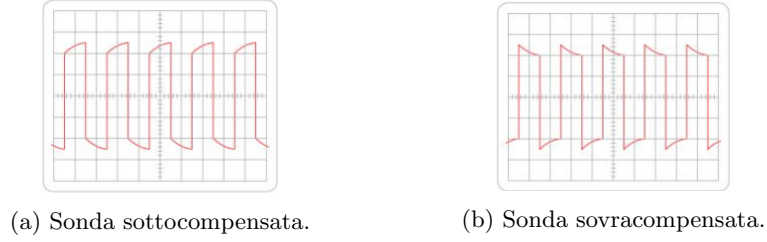


Figura 5: Visualizzazione del segnale al variare della compensazione della sonda.

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.

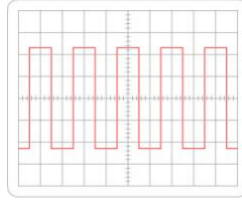


Figura 6: Sonda compensata.

### 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  $\eta$  è il fattore di non idealità.

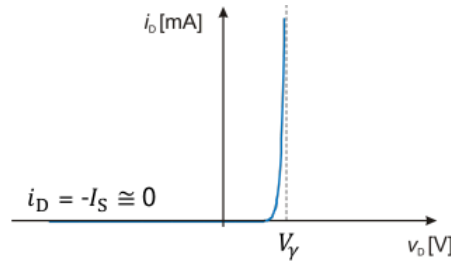


Figura 7: Caratteristica statica di un diodo.

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  $V_\gamma$ , il diodo tende a comportarsi come un generatore ideale indipendente di tensione di valore pari a  $V_\gamma$ .

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.

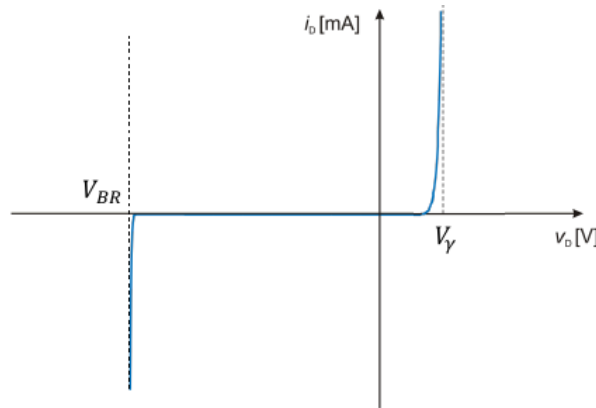


Figura 8: Caratteristica statica di un diodo di Zener.

## 3.4 Raddrizzatore a semplice semionda

Circuito fondamentale 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.

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

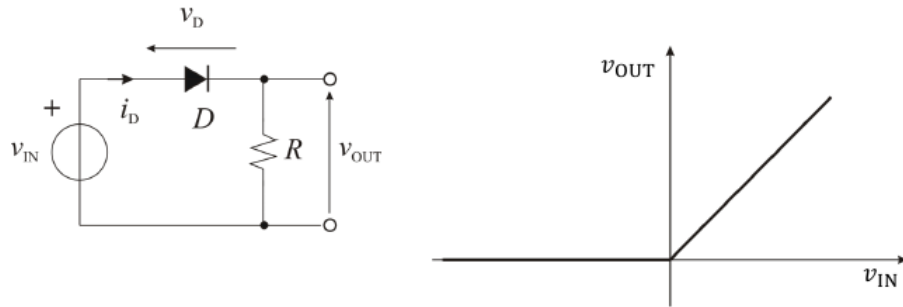


Figura 9: Circuito e transcaratteristica statica di un raddrizzatore a semplice semionda.

### 3.5 Protezione ESD

Circuito usato come protezione da scariche elettrostatiche, caratterizzato dall'imposizione di una tensione massima e di una tensione minima.

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

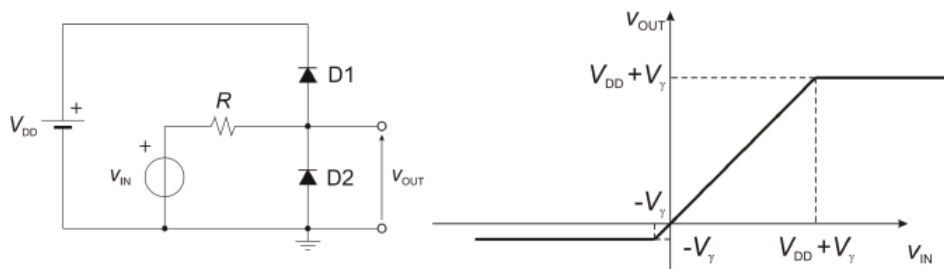


Figura 10: Circuito e transcaratteristica statica di una protezione ESD.

## 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.

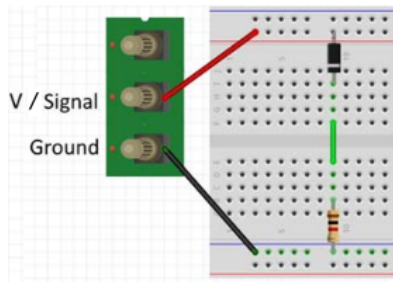


Figura 11: Circuito.

Successivamente, per mezzo del multimetro, abbiamo misurato la resistenza, verificando che tale valore rientri nel 5% di tolleranza dato dal costruttore. Abbiamo alimentato, collegando la breadboard all'alimentatore in DC per mezzo di due cavi a banana, il circuito, dopodichè 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 ed abbiamo ripetuto l'esperienza.

## 4.2 Raddrizzatore a semplice semionda

Abbiamo realizzato il circuito richiesto, collegando un condensatore in parallelo al circuito e sostituendo il diodo di Zener con il diodo usato precedentemente, ed abbiamo misurato l'ampiezza  $V_{pp}$  del segnale al variare della capacità del condensatore.

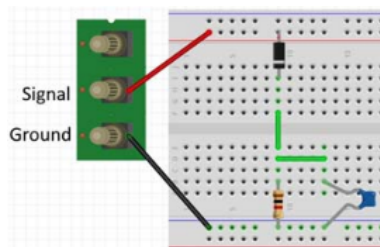


Figura 12: Circuito.

In questo modo, abbiamo potuto apprezzare come la capacità del condensatore influenzi il segnale in uscita rendendolo più o meno (**approssimato?**). Infine, abbiamo sostituito il diodo con il diodo di Zener ed abbiamo ripetuto l'esperienza.

## 4.3 Rivelatore di picco



## 4.4 Circuito per la protezione da scariche elettrostatiche

# 5 Risultati

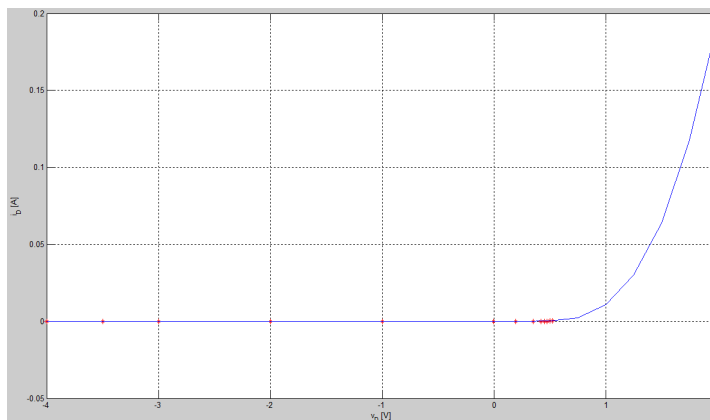
## 5.1 Caratteristiche statiche

### 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 $\mu$ A
0.6	43.5 mV	17.9 $\mu$ A
0.8	191 mV	34.7 $\mu$ A
1	373 mV	53.1 $\mu$ A
1.5	847 mV	101 $\mu$ A
2	1.33 V	149 $\mu$ 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  $V_\gamma$  è pari a, circa, 500 mV.



(a) Caratteristica 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.

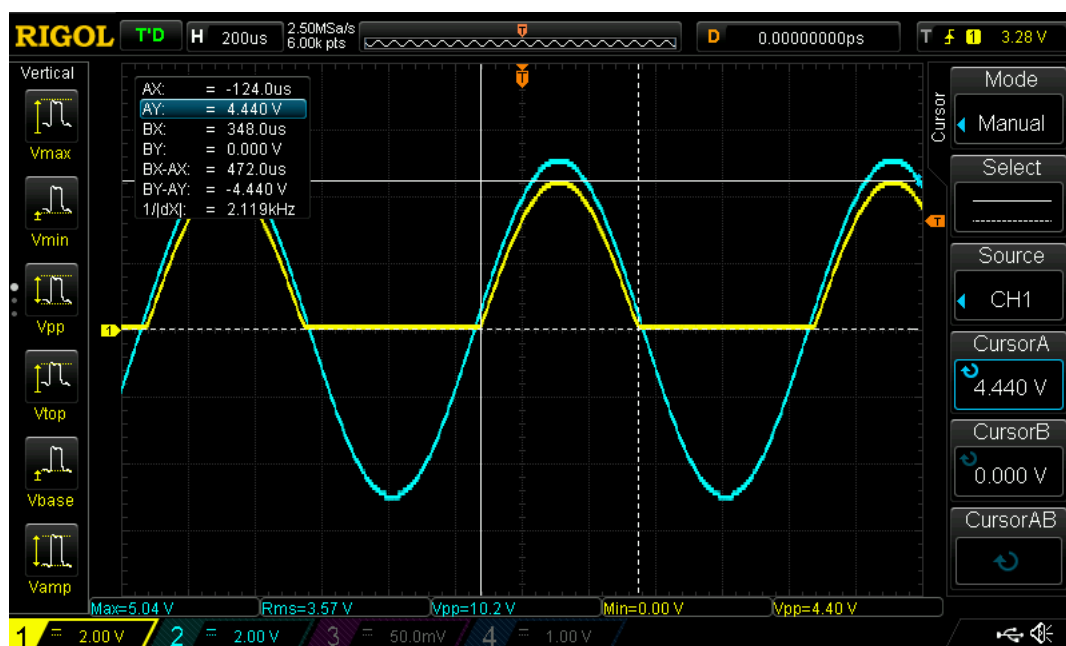


Figura 14: Segnale originale e segnale prelevato a valle del diodo.

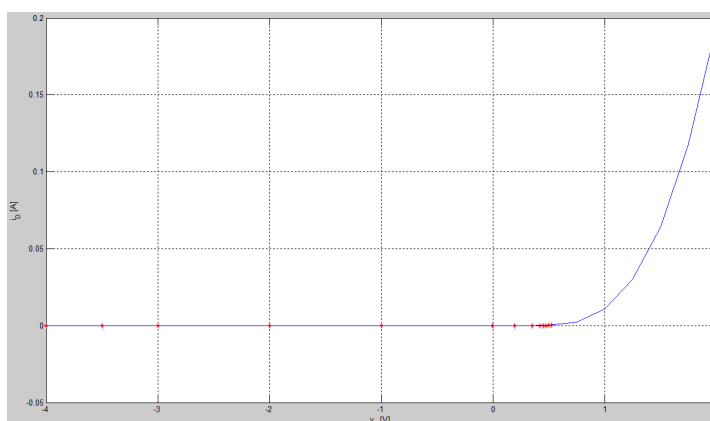
In seguito, abbiamo misurato l'ampiezza di picco del segnale in output, ottenendo 4.40 V.

### 5.1.2 Diodo di Zener

Successivamente, abbiamo rieseguito la procedura utilizzando il diodo di Zener; vanno sottolineati i valori ottenuti 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 $\mu$ A
-3.5	-2.81 mV	-0.284 $\mu$ A
-3	-2.32 mV	-0.234 $\mu$ A
-2	-1.33 mV	-0.134 $\mu$ 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 $\mu$ A
0.8	191 mV	19.2 $\mu$ A
1	373 mV	37.7 $\mu$ A
1.5	847 mV	85.6 $\mu$ A
2	1.33 V	134 $\mu$ A

Come si può intuire dai valori misurati, la tensione di soglia  $V_\gamma$  è pari a, circa, 500 mV, mentre la tensione di breakdown  $V_{BR}$  è pari a, circa, 500 mV. 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.



(a) Caratteristica statica del diodo di Zener.

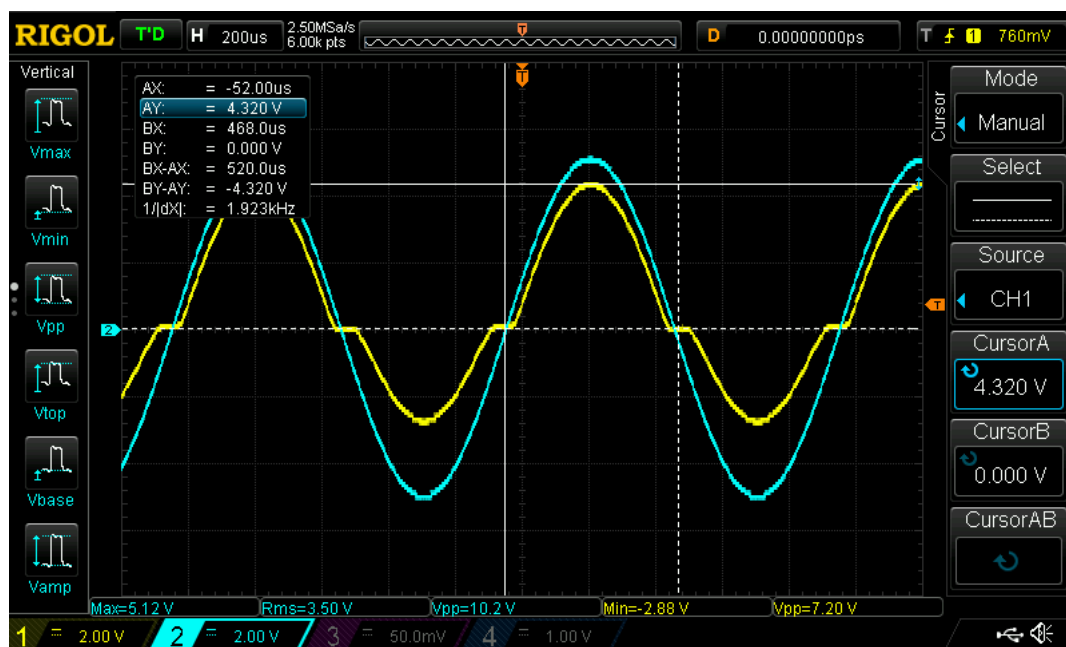


Figura 16: Segnale originale e segnale prelevato a valle del diodo di Zener.

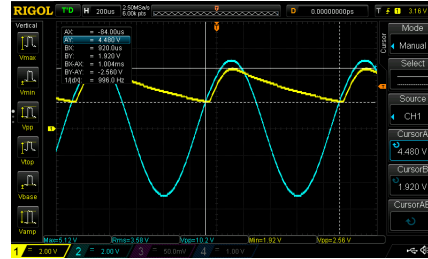
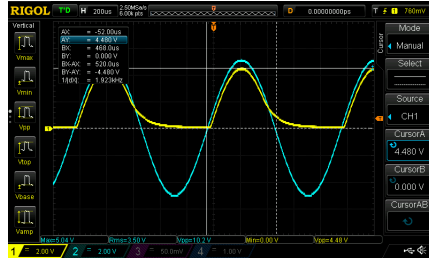
Come fatto in precedenza, abbiamo misurato l'ampiezza di picco del segnale in output, ottenendo 4.32 V.

## 5.2 Raddrizzatore a semplice semionda

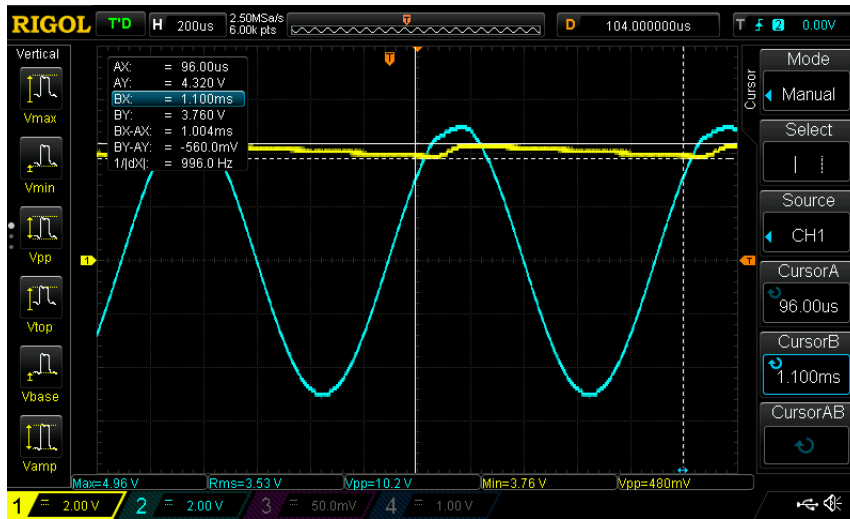
### 5.2.1 Diodo

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

$C_1$	$C_2$	$C_3$
4.48 V	2.56 V	480 mV



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



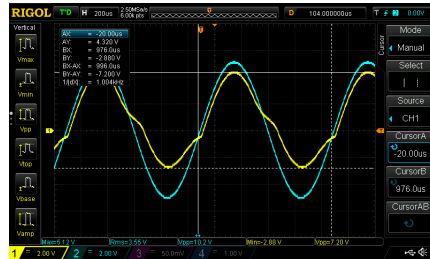
(c) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 1 μF.

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.

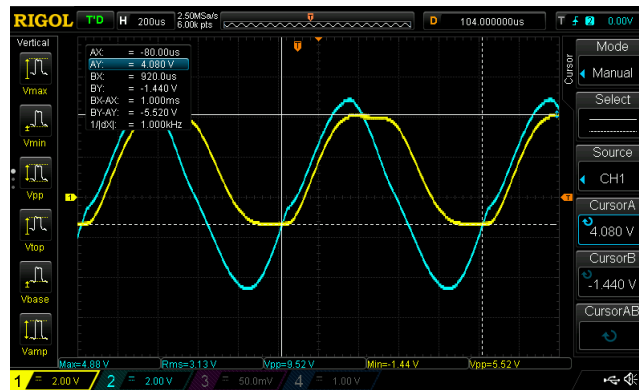
$C_1$	$C_2$	$C_3$
7.20 V	6.88 V	5.52 V



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

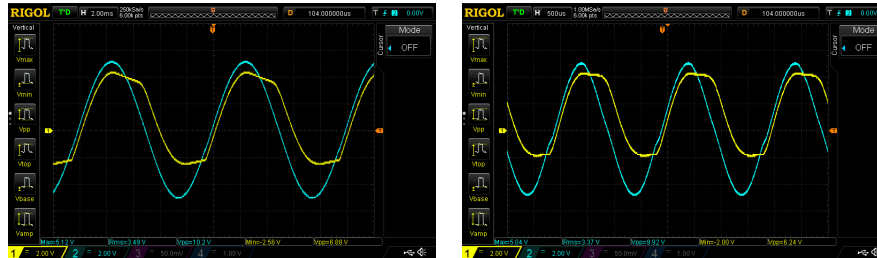


(b) Raddrizzatore a semplice semionda con il condensatore da 100 nF.



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

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



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



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

### **5.3 Rivelatore di picco**

.

### **5.4 Circuito per la protezione da scariche elettrostatiche**

.

## **6 Conclusioni**

### **6.1 Caratteristiche statiche**

.

### **6.2 Raddrizzatore a semplice semionda**

.

### **6.3 Rivelatore di picco**

.

### **6.4 Circuito per la protezione da scariche elettrostatiche**

.