



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE (DEI)

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

SVILUPPO DI UN SISTEMA DI MISURA PER LA CARICA SUPERFICIALE PRODOTTA DA UNA SCARICA A BARRIERA DIELETTRICA

Tesi di laurea magistrale in Elettrodinamica Quasi Stazionaria E Non Stazionaria M

Relatore

Prof. Gabriele Neretti

Presentata da

Sara Nicoli

Correlatori

Dott. Paolo Seri

Dott. Arturo Popoli

Sessione IV

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

Sommario	2
Indice Figure	4
Introduzione	7
1. Fondamenti di Plasmi e Scariche Elettriche	7
1.1. Cos'è il plasma?	7
1.1.1. Plasmi caldi e freddi	8
2. Attuatori DBD	9
2.1. Scarica a barriera dielettrica (DBD)	9
2.2. Dinamica di scarica	11
3. Studio del reattore volumetrico e approccio sperimentale adottato	14
4. Setup dell'esperimento	18
4.1. Strumentazione	18
4.2. Realizzazione del reattore volumetrico	19
4.2.1. Simulazione del modello volumetrico tramite FEMM	22
4.2.2. Calcolo, stima e misura delle capacità	23
4.3. Avvio della prova	24
4.3.1. Set up di prova per la caratterizzazione della scarica	24
4.3.2. Set up per la stima di carica depositata	25
4.3.3. Foto della scarica tramite ICCD camera	31
4.3.4. Set up sperimentale con OPAMP	36
5. Descrizione dei risultati ottenuti	40
5.1. Simulazione FEMM della ripartizione della tensione sul reattore	40
5.2. Risultati a 100 Hz	42
5.2.1. Caratterizzazione della scarica	42
5.2.2. Caratterizzazione del setup	45
5.2.3. Misure di carica depositata a scarica accesa	48
5.2.4. Simulazione FEMM della carica depositata	53

5.3.	Risultati a 1 kHz	56
5.3.1.	<i>Caratterizzazione della scarica</i>	56
5.3.2.	<i>Misure di carica depositata a scarica accesa</i>	59
5.4.	Risultati a 25 kHz	64
5.4.1.	<i>Caratterizzazione della scarica</i>	64
5.4.2.	<i>Misure di carica depositata a 25kHz</i>	67
5.5.	Risultati misure con OPAMP	71
5.6.	Confronto 100 Hz-1kHz-25kHz.....	73
5.7.	Confronto con simulazioni numeriche di una DBD volumetrica.....	75
6.	Conclusioni	78
	Bibliografia	80

Indice Figure

Figura 1.1: andamento della temperatura elettronica e di quella ionica in funzione della pressione	9
Figura 2.1: configurazioni comuni di scariche a barriera dielettrica (DBD): piane (a,b,c), cilindrica (d).....	9
Figura 2.2: configurazione anulare di una DBD per generare un flusso di specie reattive ortogonale al piano....	10
Figura 2.3: configurazione ad armature piane e parallele	10
Figura 3.1: modello del reattore volumetrico non in scala.....	14
Figura 3.2: PCB con piste circolari, il segnale viene portato all'esterno tramite gli elettrodi quadrati	15
Figura 3.3: reattore EHD con elettrodo HV e piste parallele che rilevano la carica depositata a distanza crescente dal plasma	15
Figura 3.4:circuito elettrico equivalente del reattore.....	16
Figura 3.5:circuito elettrico equivalente del reattore e del partitore capacitivo in uscita	17
Figura 4.1: modello del setup sperimentale, con strumenti di acquisizione	19
Figura 4.2: modello reattore volumetrico.....	19
Figura 4.3: modello elettrico del reattore	20
Figura 4.4: elettrodo HV di alluminio coperto di kapton	20
Figura 4.5: elettrodo di terra piano di alluminio, coperto dal primo strato di kapton.....	20
Figura 4.6: elettrodo flottante tra i due strati di kapton attraverso il quale viene portato fuori il segnale	21
Figura 4.7: reattore completo con vista dall'alto	21
Figura 4.8: elettrodo HV con i distanziatori di mylar	21
Figura 4.9: reattore completo con vista dal lato. Si nota la sottile regione di scarica in aria tra i due elettrodi	22
Figura 4.10: modello FEMM del reattore	22
Figura 4.11: partitore capacitivo	23
Figura 4.12: modello elettrico reattore e partitore capacitivo	23
Figura 4.13: reattore con in serie il condensatore di misura e posizionamento delle sonde.....	24
Figura 4.14: strumentazione utilizzata. Generatore di funzione, DC power supply, voltmetro elettrostatico, amplificatore HV.....	24
Figura 4.15: circuito elettrico equivalente reattore e partitore capacitivo definitivo con sonde.....	26
Figura 4.16: set up definitivo con reattore, partitore, voltmetro elettrostatico, sonda LV	27
Figura 4.17: modello elettrico con partitore definitivo	28
Figura 4.18: modello reattore e partitore capacitivo	30
Figura 4.19: modello reattore con $C_{mis}=84nF$ in serie per caratterizzare la scarica.....	30
Figura 4.20: streamer di corrente con $f=100$ Hz	32
Figura 4.21: streamer a 100 Hz con $exptime=20\mu s$. Modellazione del reattore per far capire dove si verifica la scarica	32
Figura 4.22: scarica a 100 us e gain 900, uniforme nella regione di scarica	33
Figura 4.23: streamer di corrente con $f=1$ kHz	33
Figura 4.24: 1 kHz, $V_{in}=2.8$ kV, $exptime=5\mu s$ gain 900	33
Figura 4.25: scarica a 1kHz, $V_{in}=2.8$ kV, $exptime=200$ us e gain=750	34
Figura 4.26: streamer di corrente con $f=25$ kHz	34
Figura 4.27: 25 kHz, $V_{in}=2.8kV$, $exptime=0.5$ us, gain 900	35

Figura 4.28: $f=25\text{kHz}$, $V_{in}=2.8\text{kV}$, $\text{exptime}=3\text{ us}$, $\text{gain } 750$	35
Figura 4.29:evaluation board con LMP7721.....	37
Figura 4.30:schema elettrico evaluation board.....	37
Figura 4.31:circuito equivalente intero setup con opamp in configurazione voltage follower	38
Figura 4.32: opamp con ingresso + protetto da diodi Schottky.....	39
Figura 5.1: risultati modello FEMM della tensione sul reattore.....	40
Figura 5.2: andamento tensione in funzione della distanza dall'elettrodo HV	41
Figura 5.3:diagramma di Lissajous $f=100\text{Hz}$	42
Figura 5.4:potenza trasferita alla scarica alle varie tensioni di alimentazione	42
Figura 5.5: capacità del plasma a scarica spenta calcolato come pendenza del diagramma di Lissajous	43
Figura 5.6:capacità del plasma a scarica accesa, calcolato cioè come pendenza del diagramma di Lissajous quando V_{in} supera la tensione di innesco	44
Figura 5.7:tensione sull'elettrodo flottante misurata con il voltmetro elettrostatico	45
Figura 5.8: confronto tensione con voltmetro elettrostatico e tensione riportata alla piazzola di misura con K_p .	46
Figura 5.9:tensione voltmetro elettrostatico, tensione partitore riportata tramite K_p , corrente per evidenziare la dinamica di scarica.....	47
Figura 5.10:tensione misurata con il voltmetro elettrostatico e tensione dal partitore capacitivo riportata alla piazzola tramite K_p (filtrate).....	47
Figura 5.11: densità di carica in funzione del tempo a 100 Hz	48
Figura 5.12:diagramma di Lissajous a 100 Hz della carica dalla misura di tensione con sonda elettrostatica.....	49
Figura 5.13:diagramma di Lissajous a 100 Hz della carica depositata stimata tramite il condensatore di misura	49
Figura 5.14: confronto carica stimata con sonda elettrostatica e dalla misura sul condensatore.....	50
Figura 5.15:confronto Q con sonda elettrostatica e con condensatore di misura	51
Figura 5.16: zoom della Q misurata con voltmetro elettrostatico e con condensatore di misura per evidenziare la dinamica.....	52
Figura 5.17:streamer di corrente a 100 Hz e conseguente aumento della tensione V_{out} sul partitore	52
Figura 5.18:risultato tensione simulazione FEMM avendo imposto densità di carica	54
Figura 5.19: andamento tensione nel reattore da FEMM	54
Figura 5.20: Evoluzione della tensione avendo in funzione della distanza dall'elettrodo HV	55
Figura 5.21:Diagramma di Lissajous a 1 kHz	56
Figura 5.22: potenza a 1 kHz	57
Figura 5.23:evoluzione capacità a scarica spenta a 1 kHz	57
Figura 5.24:capacità plasma a scarica accesa a 1 kHz	58
Figura 5.25:densità di carica depositata con la misura sul partitore capacitivo a 1kHz	59
Figura 5.26: diagramma di Lissajous a 1 kHz misurata dal partitore capacitivo.....	60
Figura 5.27:diagramma di Lissajous della carica depositata dalla misura sul condensatore di misura	61
Figura 5.28: Q in funzione del tempo stimata dalla tensione sul partitore e dal condensatore di misura.....	62
Figura 5.29: streamer di corrente e conseguente aumento di V_{out} riportata a 1 kHz	63
Figura 5.30: diagramma di Lissajous a 25 kHz	64
Figura 5.31: capacità plasma a scarica spenta 25 kHz	65

Figura 5.32:potenza iniettata a 25 kHz.....	65
Figura 5.33: capacità plasma a scarica accesa 25 kHz	66
Figura 5.34: densità di carica dalla misura della Vout sul partitore	67
Figura 5.35: diagramma di Lissajous della Q depositata rilevata tramite la misura Vout sul partitore capacitivo	68
Figura 5.36:diagramma di Lissajous della carica depositata valutata dalla misura sul condensatore di misura a 25 kHz.....	69
Figura 5.37:streamer di corrente e conseguente aumento della Vout rilevata dal partitore a 25 kHz	70
Figura 5.38:setup sperimentale con OPAMP in voltage follower, sonde di bassa tensione posizionate.....	71
Figura 5.39:confronto tensione Vout e Vopamp per valutare la risposta dinamica	72
Figura 5.40: confronto potenza trasferita a 100Hz, 1 kHz, 25 kHz in scala semilogaritmica	73
Figura 5.41: diagramma di Lissajous per Vin=2.8kV a 100 Hz, 1 kHz, 25 kHz.....	74
Figura 5.42: diagramma di Lissajous della carica depositata con Vin=2.8kV, per f=100Hz, 1kHz 25kHz, dalla misura su Cmis.....	74
Figura 5.43: modello reattore DBD simulato	75
Figura 5.44: densità di carica depositata sul dielettrico I e II nella simulazione	77

Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è lo sviluppo di un sistema di misura tempo-risolta della carica prodotta da una scarica a barriera dielettrica in un reattore volumetrico. La fisica di questo fenomeno è ancora poco conosciuta, ma è importante sia per ragioni scientifiche che per ragioni tecnologiche ed industriali. Infatti la distribuzione spazio temporale delle cariche durante e dopo una scarica elettrica non è nota nel dettaglio, soprattutto per la complessità del fenomeno, in quanto intervengono molte reazioni chimiche (ossidazione per la formazione di specie reattive, corrosione, ionizzazione e ricombinazione).

Dal punto di vista dell'interesse tecnologico essa è fondamentale per la diagnostica degli isolanti dei cavi HV, in particolare per la conducibilità superficiale e per le scariche parziali.

Queste misure sono piuttosto complesse, perché il potenziale da rilevare è floatante e per misurare le cariche è necessario "intrappolarle" senza drenarle verso terra tramite la sonda. Inoltre la scarica ha una dinamica elevata che deve essere seguita ed acquisita accuratamente.

Questa tesi si occupa quindi di trovare un set up affidabile e ripetibile per effettuare misure tempo risolte di carica depositata all'interno del reattore a scarica accesa.

1. Fondamenti di Plasmi e Scariche Elettriche

1.1. Cos'è il plasma?

Un plasma è un gas ionizzato costituito da un insieme di particelle cariche (elettroni e ioni), atomi e molecole, ma che globalmente si mantiene neutro, cioè nel quale la carica elettrica totale è nulla. Esso è definito il "quarto stato della materia" e può essere raggiunto fornendo una adeguata quantità di energia a un gas, tale che atomi e molecole si scindano, formando ioni positivi ed elettroni.

1.1.1. Plasmi caldi e freddi

Poiché non tutte le particelle di un gas devono essere ionizzate per poterlo definire plasma, possiamo distinguere diversi tipi di plasma da parzialmente a interamente ionizzati. All'interno di un plasma le particelle leggere (elettroni) presentano una temperatura e quindi un'energia diversa da quelle pesanti (ioni e neutri). L'energia del campo elettrico è usata principalmente per accelerare gli elettroni che urtano a loro volta altre particelle trasferendo energia. Ciò spiega perché essi hanno un'energia e quindi una temperatura superiore. Un plasma si definisce caldo (o termico) quando $T_e = T_H$ e si parla di plasma freddo (o non termico) se $T_e \gg T_H$. T_e è la temperatura elettronica, T_H la temperatura degli ioni e delle particelle pesanti.

A seguito di continue collisioni, le due temperature possono raggiungere l'equilibrio, a patto che ci sia tempo o energia sufficiente affinché tale processo possa avvenire.

Poiché la temperatura di un mezzo è definita dalla temperatura media pesata sulla massa di ogni particella all'interno di tale volume, un plasma freddo ha una temperatura relativamente bassa (300 K ÷ 1000 K) se confrontata con quella di uno caldo ($10^4 \div 10^8$ K).

Questa è la ragione per cui i plasmi freddi sono di norma preferiti quando si lavora con materiali biologici e microbiologici nonostante il loro contenuto energetico sia inferiore. Il valore aggiunto di avere una temperatura macroscopica non elevata è un ridotto consumo di potenza e di poter lavorare a contatto con superfici sensibili al calore (tessuti biologici, oggetti di uso comune da sanificare etc.).

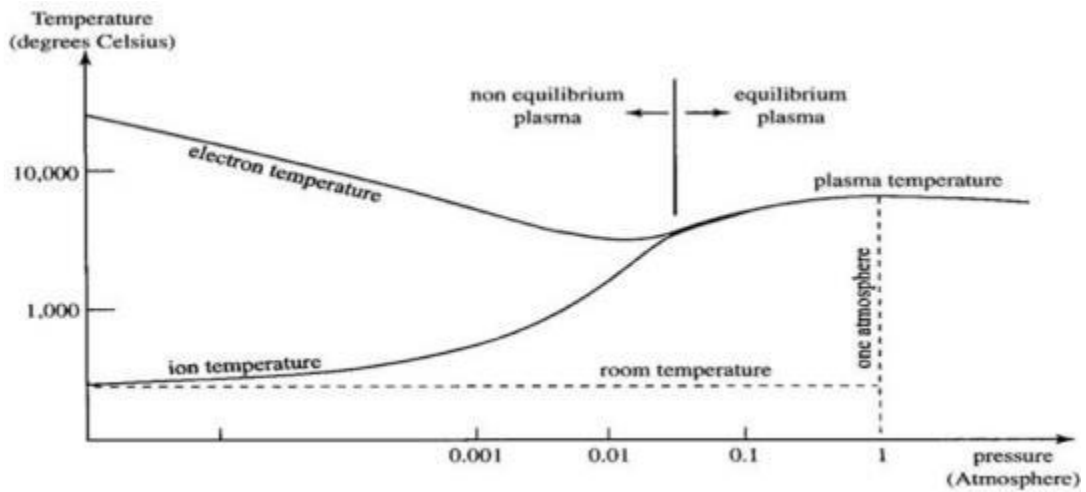


Figura 1.1: andamento della temperatura elettronica e di quella ionica in funzione della pressione

2. Attuatori DBD

2.1. Scarica a barriera dielettrica (DBD)

Una DBD è una scarica elettrica generata da due elettrodi affacciati, separati da uno o più strati dielettrici e gassosi.

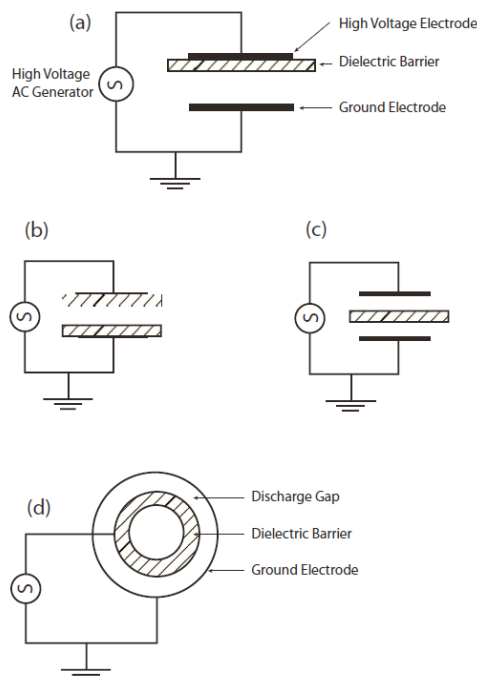


Figura 2.1: configurazioni comuni di scariche a barriera dielettrica (DBD): piane (a,b,c), cilindrica (d)

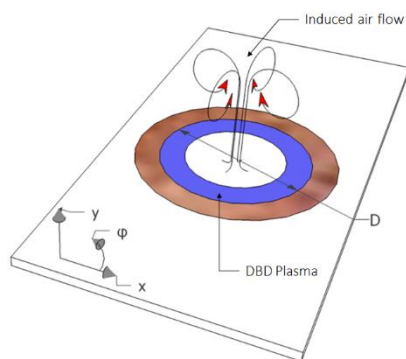


Figura 2.2: configurazione anulare di una DBD per generare un flusso di specie reattive ortogonale al piano

Le geometrie più comuni sono quella volumetrica, superficiale, anulare come mostrato in Figura 2.1 e Figura 2.2. La configurazione più semplice è quella di un condensatore ad armature piane e parallele: tra due elettrodi paralleli vi è un gas, nel quale avviene la scarica, ed almeno uno strato di dielettrico (Figura 2.3). La funzione principale della barriera dielettrica è quella di limitare l'intensità di corrente elettrica durante la scarica in maniera non dissipativa.

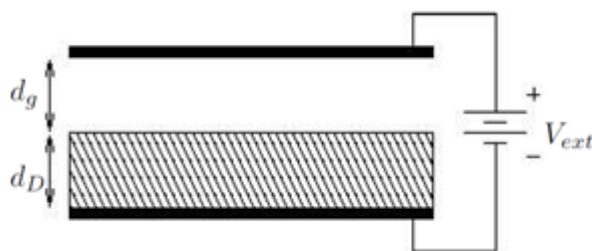


Figura 2.3: configurazione ad armature piane e parallele

La tecnologia DBD è in rapido sviluppo perché di grande interesse scientifico ma soprattutto industriale. Questa tecnologia è estremamente vantaggiosa perché può essere utilizzata a pressione atmosferica ed essendo un plasma non termico, mantiene una temperatura globale bassa. Trova pertanto largo utilizzo nel settore biomedicale per la sterilizzazione di oggetti o nel plasma medicine come ad esempio nella cicatrizzazione delle ferite o come sostitutivo della radio e chemioterapia nel combattere le cellule tumorali.

Questo genere di scariche è diffuso anche nel settore aerospaziale per il controllo di turbolenze o propulsori al plasma.

2.2. Dinamica di scarica

Non appena gli elettrodi sono alimentati con una tensione che supera quella di breakdown V_b , la scarica si avvia nel gas.

$$V_{ext} > V_b = E_b \cdot d_g ; E_b \sim 30 \frac{kV}{cm} \text{ in air}$$

Si può immaginare la dinamica della scarica a barriera dielettrica costituita dai seguenti passaggi:

1. Innesco della scarica locale: dovunque il campo elettrico superi le condizioni di breakdown, a causa della fluttuazione della sua intensità o per imperfezioni degli elettrodi, comincia ad avvenire la ionizzazione. Una nuvola di elettroni e di ioni positivi si forma in prossimità della superficie del catodo e si innesca la valanga elettronica;
2. Separazione di carica spaziale: poichè gli elettroni hanno una mobilità maggiore a causa della loro massa ridotta, sono accelerati verso l'anodo dal campo elettrico, mentre gli ioni si mantengono in una posizione quasi stazionaria. Si formerà così una distribuzione non uniforme di carica spaziale all'interno dell'area ionizzata;
3. Formazione dei canali di streamer: la distribuzione di carica non uniforme distorce il campo elettrico iniziale, aumentando localmente in prossimità del polo negativo di tale nuvola di cariche, generando maggiore ionizzazione. Questa retroazione positiva determina un'onda di ionizzazione, detta "streamer", che procede a valanga verso l'anodo, con una dinamica estremamente rapida;
4. Propagazione dello streamer: I canali di streamer sono legati alla disuniformità della distribuzione di carica spaziale. Possono propagarsi dal catodo verso l'anodo come precedentemente descritto, ma anche in direzione opposta. Mentre il capo dello streamer avanza verso l'anodo, una regione

caricata positivamente è lasciata indietro. Tale disuniformità positiva innesca uno streamer verso il catodo con una dinamica simile a quella già discussa;

5. Deposizione della carica e smorzamento della scarica: le cariche dello streamer sono depositate sullo strato superficiale del dielettrico. Mentre le cariche si formano rapidamente e si dispongono sul dielettrico, la riduzione locale del campo elettrico al punto che $V_{locally} < V_b$, smorza la scarica e previene la formazione di scariche nelle vicinanze.

Successivamente alla deposizione di carica sul dielettrico, il volume interessato dalla micro-scarica mostra deboli livelli di ionizzazione per tempi relativamente lunghi (10 μ s per un gap di scarica di 1 mm).

Il residuo della micro-scarica dà quindi luogo al cosiddetto effetto memoria, cioè facilita la formazione di nuove micro-scariche nello stesso punto alla successiva inversione di polarità. Di conseguenza la carica viene depositata su uno spazio maggiore, contribuendo alla formazione di un plasma più omogeneo. Tali micro-scariche sono state definite come una singola entità ma in realtà sono costituite da migliaia di filamenti attraverso la loro sezione trasversale (< 100 μ m di diametro).

Le micro-scariche hanno durata di pochi ns quindi, durante ogni ciclo se ne sviluppano un numero molto elevato, tipicamente circa 10^6 microscariche/cm²s, ma tale valore dipende dalla potenza specifica e dalla presenza di fonti di pre-ionizzazione.

Inoltre, ogni micro-scarica si comporta nello stesso modo, cioè si innesca ad una determinata tensione e si spegne dopo aver depositato una certa quantità di carica.

Il calcolo della potenza effettiva prodotta da una scarica a barriera dielettrica può essere fatto per mezzo della relazione di Manley.

$$P = 4fC_D^2 + \frac{V_{min}(V - V_{min})}{C_D C_G} \quad \text{Eq. 2.2.1}$$

dove f e V sono rispettivamente frequenza e ampiezza della tensione applicata, C_D e C_G sono rispettivamente la capacità del dielettrico e del gap di scarica, V_{min} è la tensione minima a cui iniziano a formarsi le micro-scariche.

3. Studio del reattore volumetrico e approccio sperimentale adottato

Il reattore volumetrico utilizzato in quest'attività è mostrato in figura 3.1 ma non è in scala.

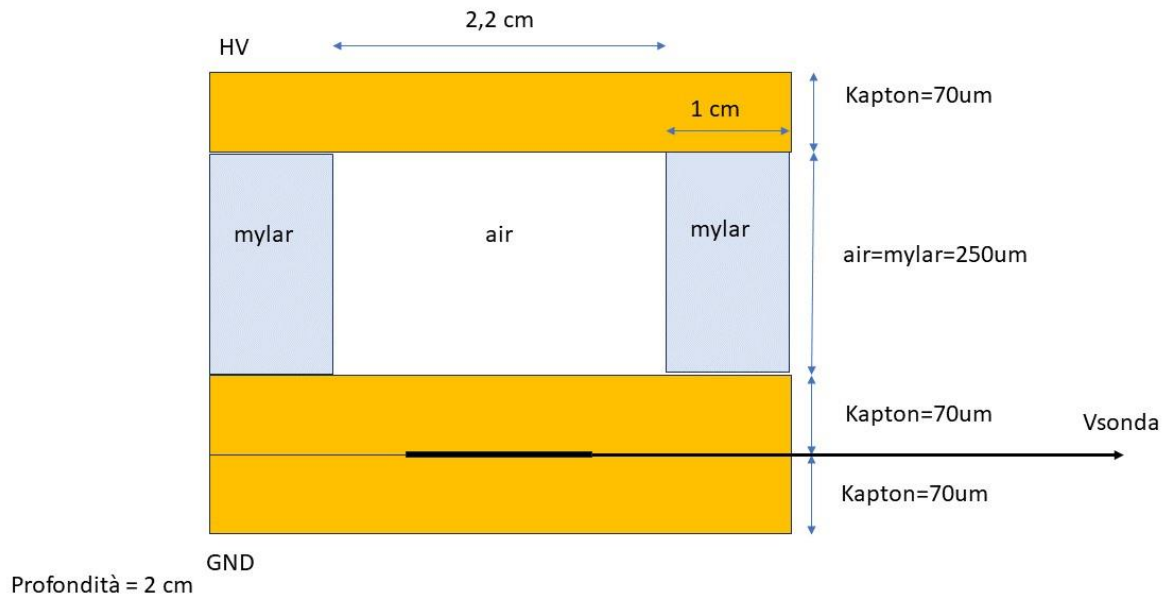


Figura 3.1: modello del reattore volumetrico non in scala

In questo reattore le cariche si depositano sullo strato di kapton vicino alla terra a contatto con l'aria e vengono rilevate sull'elettrodo floatante identificato da Vsonda, che risentirà del campo indotto dalle cariche deposte a una distanza di 70 μm. La tensione Vsonda è misurata per valutare tale potenziale indotto.

È stato realizzato con tre strati di kapton e del mylar come distanziatore per creare la regione di scarica in aria.

Le scelte effettuate durante questo lavoro sono dovute ad evidenze scientifiche di ricerche precedenti. Come primo tentativo erano state effettuate prove con un reattore punta piano e una misura tempo risolta con un voltmetro elettrostatico, che ovviamente rilevava la tensione in un solo punto dello spazio.

Successivamente per risolvere spazialmente la misura era stata introdotta una PCB con delle piste concentriche che permettevano di misurare la carica su ogni pista e di avere quindi un'idea di come si deposita durante la scarica e di come deriva successivamente. Si era tentato di acquisire i segnali delle piste tramite il TL081 ed

altri OPAMP, che però facevano saturare sempre l'uscita, impedendo di conoscere la vera deriva della carica.



Figura 3.2: PCB con piste circolari, il segnale viene portato all'esterno tramite gli elettrodi quadrati

È stato studiato inoltre un reattore superficiale con piste equispaziate tra loro per visualizzare l'andamento del potenziale e della carica a diverse distanze dalla sorgente del plasma.

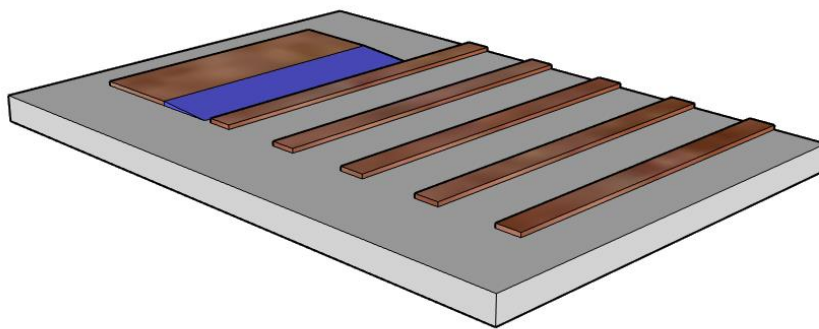


Figura 3.3: reattore EHD con elettrodo HV e piste parallele che rilevano la carica depositata a distanza crescente dal plasma

Queste misure hanno messo in evidenza i limiti dei set up adottati. Da una parte la sonda elettrostatica non permetteva di seguire i rapidi picchi di corrente dovuti agli

streamer per la sua banda limitata, dall'altra però essa permette di eseguire una misura "contactless" cioè rilevando un potenziale depositato senza drenare la carica.

Al contrario la sonda di bassa tensione ha una banda passante molto maggiore che permette di seguire le variazioni di tensione e corrente, ma drena cariche perché le misura tramite un collegamento elettrico di impedenza tutt'altro che nulla.

Quindi l'amplificatore si configura come una soluzione ottimale perché presenta una banda passante nettamente superiore alla frequenza del plasma, ma ha un'impedenza d'ingresso idealmente infinita che garantisce isolamento galvanico tra l'ingresso e l'uscita.

Per la complessità di queste misure e del setup, in questo elaborato si è indagata la carica depositata all'interno di un reattore volumetrico con misure tempo risolte.

Inoltre il comportamento di una DBD volumetrica all'interno della regione di plasma può essere simulata in diverse condizioni, sia per avere un'idea preliminare del fenomeno, sia per confermare i risultati sperimentali.

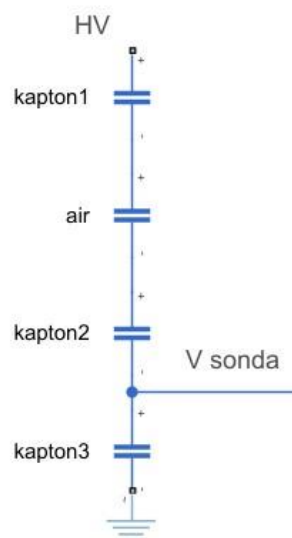


Figura 3.4: circuito elettrico equivalente del reattore

Per poter applicare il segnale V_{sonda} a un OPAMP è necessario che sia sufficientemente basso.

Per questa ragione e per avere un plasma più omogeneo, il reattore è stato alimentato con tensioni di alimentazione più basse possibile e il gap di scarica è stato mantenuto al di sotto del millimetro.

Per abbassare V_{sonda} sono stati inseriti più strati dielettrici. In particolare il nastro di kapton presenta una costante dielettrica alta (3.4) e quindi un'elevata capacità. Di conseguenza la tensione V_{sonda} secondo la semplice formula $Q=C*V$ sarà ridotta rispetto ad altri materiali con capacità inferiori.

Le misure iniziali sono state svolte con la sonda elettrostatica, posizionata sull'elettrodo floottante, per valutare la tensione rilevata e le prestazioni dello strumento.

Successivamente sono state eseguite misure con la sonda di bassa tensione e con due OPAMP (LMP7721 montato su una evaluation board e il TL081).

Inoltre, per poter misurare la tensione con una sonda LV e un OPAMP è stato introdotto un partitore capacitivo come mostrato in figura.

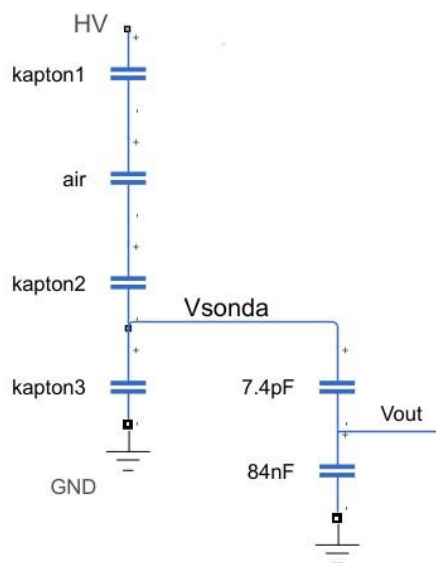


Figura 3.5: circuito elettrico equivalente del reattore e del partitore capacitivo in uscita

Nella tabella sono riportate le bandwidth degli strumenti utilizzati.

strumento	Bandwidth
Trek model 341B	3 kHz
Sonda LV (Yokogawa 700888)	400 MHz
OPAMP LMP7721	17 MHz
OPAMP TL081	1 MHz

4. Setup dell'esperimento

4.1. Strumentazione

Per l'esecuzione delle prove sono stati utilizzati:

1. High Voltage Amplifier Trek Model 20/20C-per alimentare l'elettrodo HV
2. Generatore di funzione (Agilent 33120A) come input dell'amplificatore
3. Generatore HV, HF per alimentare elettrodo HV
4. Sonda HV (Tektronix P6015A) per misurare la tensione applicata al reattore
5. Voltmetro elettrostatico (Trek model 341B) per misurare V_{sonda} sulla piazzola
6. Sonda LV (Yokogawa 700888) per misurare la tensione V_{out} sul partitore o in uscita all'OPAMP
7. Sonda di corrente ad effetto Hall (Tektronix TCP312) per misurare la corrente della scarica dall'elettrodo di terra
8. Oscilloscopio Yokogawa DL1640
9. OPAMP con correnti di bias femtoamperometriche (LMP7721)
10. OPAMP TL081
11. Fogli di mylar (materiale dielettrico)
12. Nastro di kapton (materiale dielettrico)
13. Nastro ramato
14. Fotocamera intensificata ICCD 4 Picos ICCD Camera

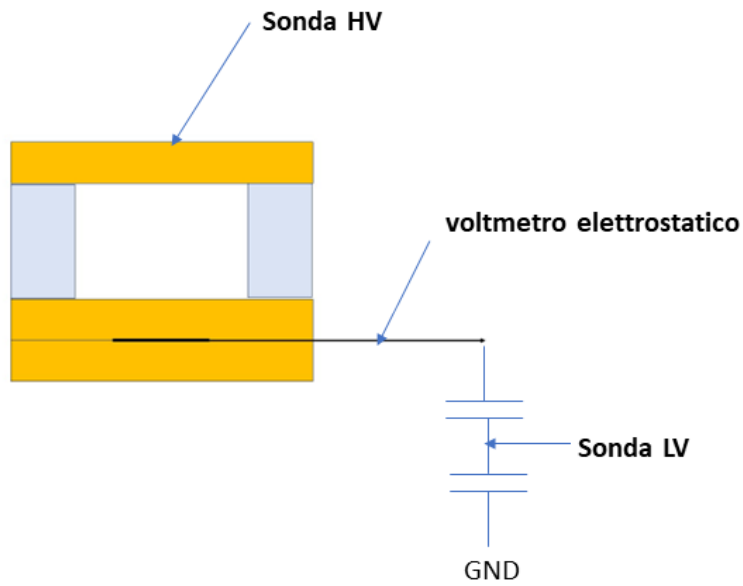


Figura 4.1: modello del setup sperimentale, con strumenti di acquisizione

4.2. Realizzazione del reattore volumetrico

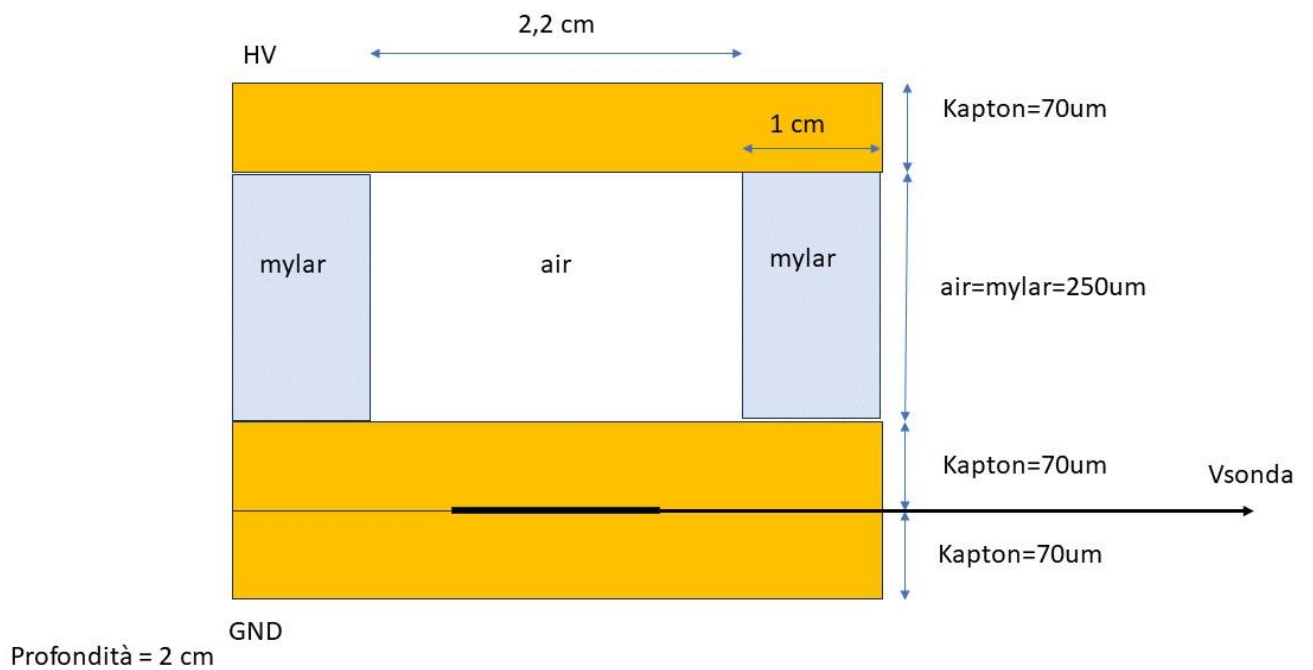


Figura 4.2: modello reattore volumetrico

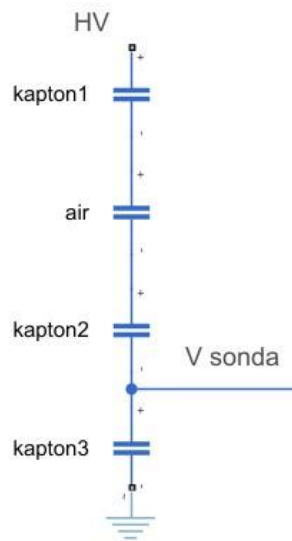


Figura 4.3: modello elettrico del reattore

Il reattore è stato realizzato con un elettrodo di alta tensione e di terra di alluminio.



Figura 4.5: elettrodo di terra piano di alluminio, coperto dal primo strato di kapton

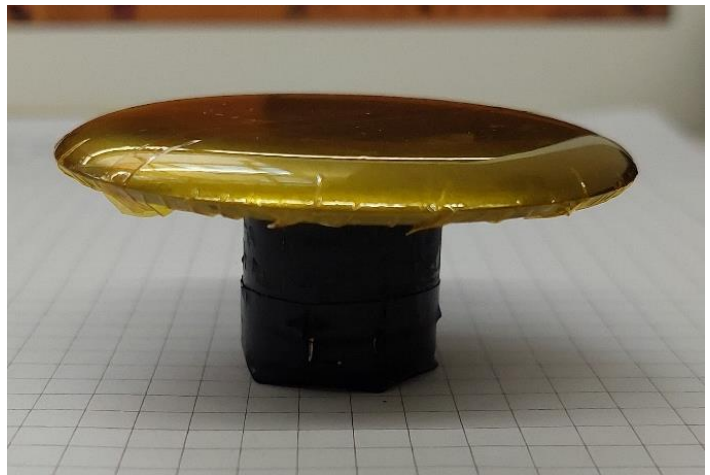


Figura 4.4: elettrodo HV di alluminio coperto di kapton

È stato applicato il nastro kapton di spessore stimato $70\ \mu\text{m}$ sull'elettrodo HV e su quello di bassa tensione come indicato in figura xxx. Tra i due strati di kapton sulla terra è stata inserita una piazzola di rame $2 \times 2\ \text{cm}$, dalla quale il segnale viene portato all'esterno con una sottile pista di circa $5\ \text{cm}$ di lunghezza e $0.5\ \text{cm}$ di larghezza e che corrisponde alla tensione V_{sonda} nello schema elettrico.

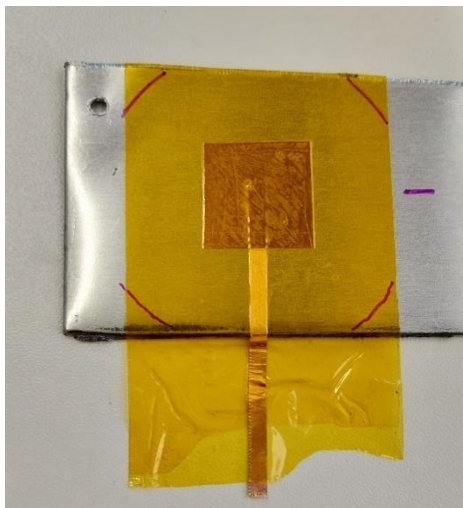


Figura 4.6: elettrodo flottante tra i due strati di kapton attraverso il quale viene portato fuori il segnale

I distanziatori di mylar hanno spessore $250\ \mu\text{m}$ e sono larghi $1\ \text{cm}$. In questo modo la zona di formazione del plasma è larga $2,2\ \text{mm}$ e profonda come l'elettrodo, ma si immagina che il plasma sia uniforme in una regione $2\ \text{cm} \times 2\ \text{cm}$.



Figura 4.8: elettrodo HV con i distanziatori di mylar



Figura 4.7: reattore completo con vista dall'alto

Da queste immagini si vede il modello definitivo, in particolare si nota la regione di aria intermedia dove si forma la scarica, che per la geometria appositamente realizzata sarà pressochè uniforme.



Figura 4.9: reattore completo con vista dal lato. Si nota la sottile regione di scarica in aria tra i due elettrodi

4.2.1. Simulazione del modello volumetrico tramite FEMM

Il modello descritto è stato simulato tramite FEMM per valutare come si ripartiva la tensione sui vari strati del dielettrico.

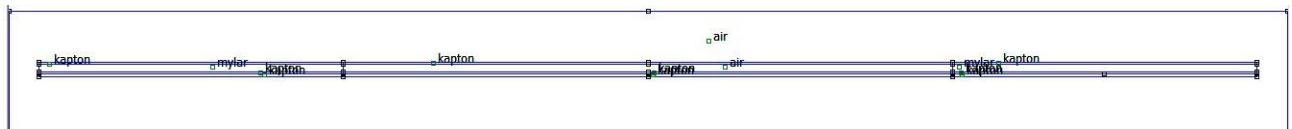


Figura 4.10: modello FEMM del reattore

Il modello è estruso per 2.25 cm di profondità anche se nella realtà un po' di plasma si forma oltre questa regione. Nel modello simulato l'altezza è diversi ordini di grandezza più piccola rispetto alla larghezza.

I risultati, descritti nel capitolo 5, hanno messo in luce che la tensione V_{sonda} in uscita al reattore era ancora troppo alta, all'incirca un centinaio di volt, quindi è stato introdotto un partitore capacitivo che è galvanicamente isolato e non drena le cariche depositate.

È stato realizzato con due condensatori da 100 nF nominali (84 nF misurati), e 10 pF nominali (7.5 pF misurati), per avere un rapporto di partizione all'incirca 1/10000 e garantire quindi tensioni adeguate all'ingresso dell'opamp, infatti

$\frac{10^2}{10^4} = 0.01 V$. Nel modello elettrico Vout rappresenta la tensione in uscita al partitore.

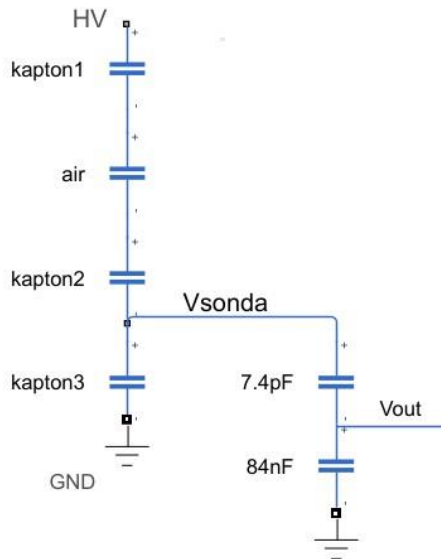


Figura 4.12: modello elettrico reattore e partitore capacitivo

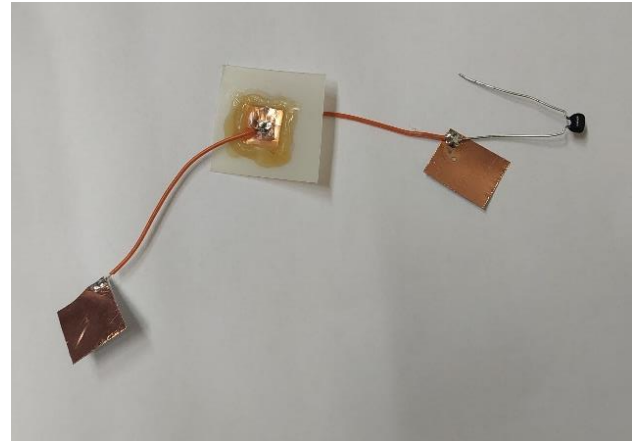


Figura 4.11: partitore capacitivo

4.2.2. Calcolo, stima e misura delle capacità

Per verificare l'attendibilità del modello, le capacità dell'ultimo strato di kapton (C_{k_3}) e dell'intero reattore (C_{HV-GND}) sono state calcolate con la formula per un condensatore ad armature piane e parallele, sono state ricavate dalla simulazione con FEMM e sono state misurate.

In particolare FEMM permette di calcolare l'energia immagazzinata in una regione selezionata.

	$C = \frac{\epsilon * S}{d}$	$C = \frac{2 * E}{V^2}$	C misurata
C_{k_3}	180 pF	197 pF	204 pF
C_{HV-GND}	39.8 pF	41.6 pF	45 pF

Si nota che le capacità calcolate con la formula del condensatore ad armature piane e parallele è sempre minore delle altre. Questo è probabilmente dovuto al fatto che non sono considerati gli effetti di bordo e che non si considera che la scarica si può formare anche al di sotto del mylar, aumentandone la superficie. Inoltre nel modello FEMM lo strato di dielettrico è stato approssimato interamente con il kapton, nella realtà è costituito anche da colla.

4.3. Avvio della prova

4.3.1. Set up di prova per la caratterizzazione della scarica



Figura 4.14: strumentazione utilizzata. Generatore di funzione, DC power supply, voltmetro elettrostatico, amplificatore HV

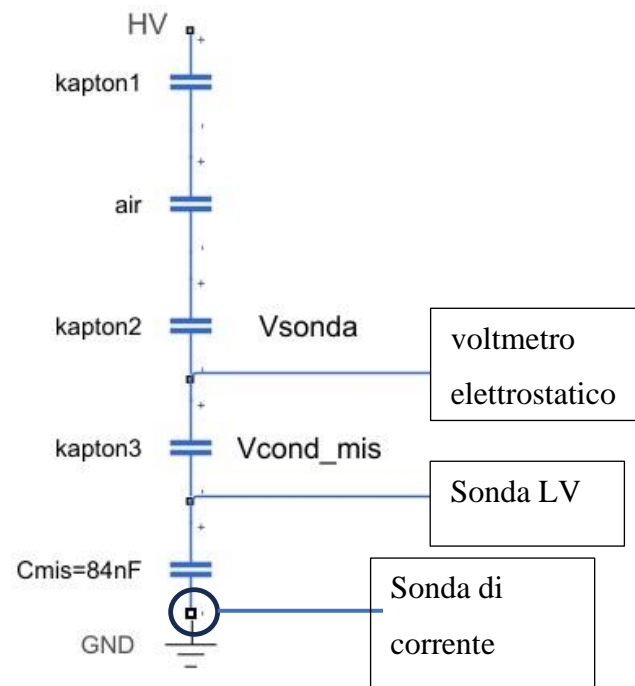


Figura 4.13: reattore con in serie il condensatore di misura e posizionamento delle sonde

Per caratterizzare la scarica sono state eseguite delle misure collegando un condensatore di misura $C_{mis}=84nF$.

Le prove sono state svolte alimentando con una **tensione sinusoidale** a

1. **100 Hz**
2. **1kHz**
3. **25kHz**

La tensione di picco è stata progressivamente aumentata a **step di 500 V** nel range **0.8-3.5 kVp**.

Il segnale di alimentazione è prodotto dal generatore di funzione che viene amplificato dall'amplificatore HV di un fattore 2000 per essere poi applicato all'elettrodo HV per le misure a 100 Hz e 1 kHz.

Nella configurazione a 25 kHz è stato utilizzato un generatore sviluppato dal laboratorio PTL, costituito da un convertitore con trasformatore push-pull di alta tensione e alta frequenza.

V_sonda è rilevata dal voltmetro elettrostatico posizionato a 1 mm dall'elettrodo floattante.

V_cond_mis ai capi del condensatore di misura è rilevato dalla sonda di bassa tensione.

Poiché la sonda del voltmetro elettrostatico ha banda di circa 3kHz la frequenza è fissata a 100 Hz per il primo slot di misure per inseguire bene il segnale.

Questo primo set up è necessario per valutare la potenza del plasma, le capacità e l'adeguatezza del sistema di misura.

4.3.2. Set up per la stima di carica depositata

Una volta verificato il set up dal punto di vista della scarica, ci si è concentrati sul collegamento del partitore capacitivo. La configurazione e i parametri di alimentazione sono gli stessi della configurazione di prova.

1. Il primo partitore realizzato è stato realizzato con una capacità da **6 pF** (10 nominali) e una da **100 pF** per valutare come la misura è influenzata dalla connessione a terra o meno del partitore.

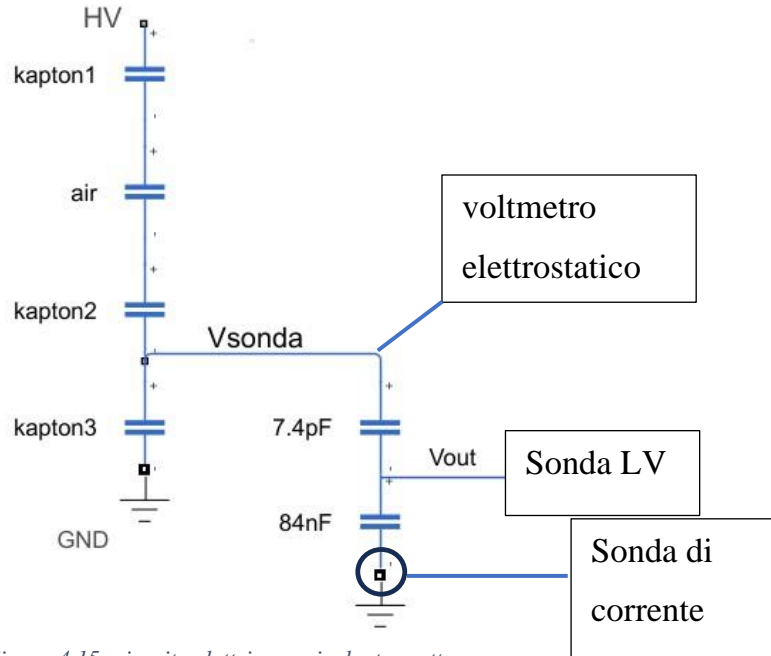
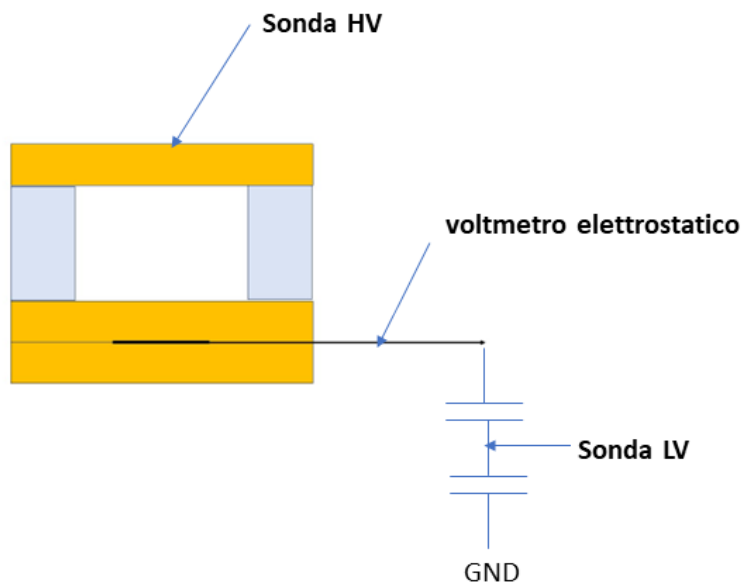


Figura 4.15: circuito elettrico equivalente reattore e partitore capacitivo definitivo con sonde

Con queste misure si è voluto valutare l'affidabilità della misura con il partitore, in termini di ampiezza della tensione e di sfasamento, confrontandola con la misura con il voltmetro elettrostatico. In particolare la V_{out} viene moltiplicata per l'inverso del rapporto di partizione introdotto dal partitore capacitivo per confrontarlo con V_{sonda} .

$$K_p = \frac{10 \text{ pF}}{(10 + 100) \text{ pF}} = 0.09$$

$$V_{out_{riportata}} = \frac{V_{out}}{K_p}$$



2. Successivamente il condensatore da 100 pF, è stato sostituito con quello da **84 nF**, introducendo la configurazione definitiva con $K_p = \frac{7.4pF}{84nF}$.

Sull'elettrodo flottante è saldato elettricamente il partitore capacitivo e la tensione è acquisita ai capi del condensatore da 84 nF (V_{out}), come mostrato in foto.

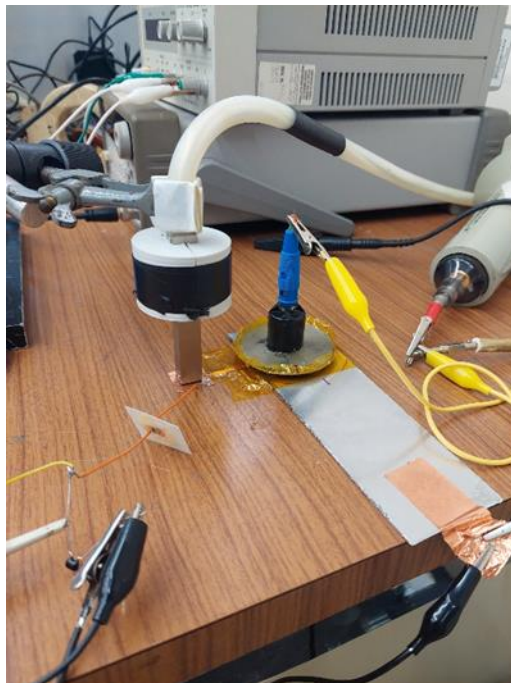


Figura 4.16: set up definitivo con reattore, partitore, voltmetro elettrostatico, sonda LV

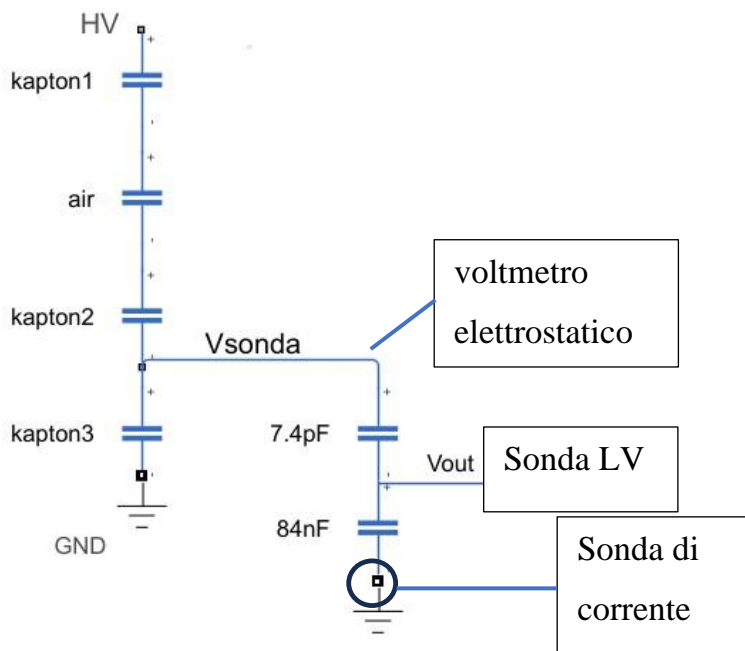


Figura 4.17: modello elettrico con partitore definitivo

La carica prodotta dalla scarica viene depositata sul primo strato di kapton a contatto con l'aria.

Essa è stata stimata in quattro modi diversi per una maggiore attendibilità:

1. **V_sonda** (tensione misurata dalla sonda elettrostatica sulla piazzola) epurata del contributo dell'alta tensione secondo il rapporto di partizione K_r tra C_{k3} e C_{HV_GND} .
2. **Vcond_mis** (tensione misurata sul condensatore di misura nella configurazione di prova) epurata del contributo della tensione dovuta al rapporto di partizione H tra C_{mis} e C_{HV_GND} .

3. **Vout** (in uscita al partitore capacitivo) riportata all'elettrodo flottante tramite l'inverso del rapporto di partizione K_p ed epurata del contributo dell'alta tensione in quel punto tramite K_r .
4. Con l'**integrale della corrente** e con il conseguente innalzamento della tensione V_{out} sul condensatore.

Vengono ora descritti nel dettaglio i metodi per calcolare la Q:

1. Voltmetro elettrostatico

Si rileva la tensione sulla piazzola V_{sonda} a cui si sottrae la tensione che ci sarebbe in quel punto solo per effetto della V_{HV} secondo il rapporto di partizione $K_r = 0.062$. K_r è ottenuto tramite simulazione FEMM tra la capacità dell'ultimo strato di kapton C_{k3} su cui è posizionato l'elettrodo flottante e la capacità dell'intero reattore.

$$V_{carica_{dep}} = V_{sonda} - K_r * V_{HV}$$

Con $S = 4,2e - 4 m^2$ (superficie dell'elettrodo flottante) e $C_{k3} = 204 pF$:

$$\sigma_{dep} = V_{carica_{dep}} * \frac{C_{k3}}{S}$$

2. Condensatore di misura

La carica è stata stimata dalla tensione V_{cond_mis} , secondo il rapporto di partizione H tra la tensione dell'intero reattore e quella di misura.

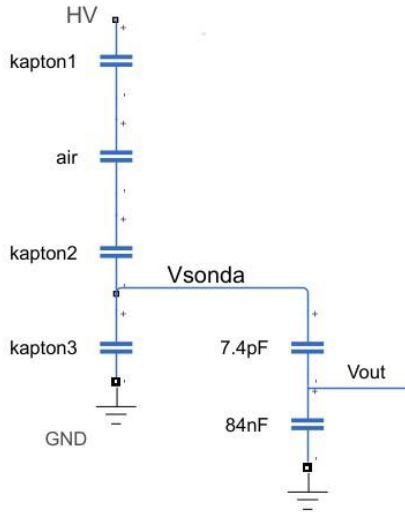


Figura 4.18: modello reattore e partitore capacitivo

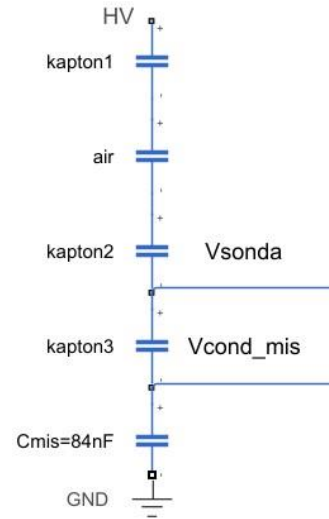


Figura 4.19: modello reattore con $C_{mis}=84nF$ in serie per caratterizzare la scarica

$$V_{carica-dep_{C_{mis}}} = V_{cond-mis} - H * V_{HV}$$

$$H = \frac{C_{HV-GND}}{C_{mis} + C_{HV-GND}} = 5.2910e - 04$$

$$Q_{dep-C_{mis}} = V_{carica-dep_{C_{mis}}} * C_{mis}$$

3. Partitore capacitivo

La carica è stimata dalla misura di V_{out} sull'uscita del partitore capacitivo riportata tramite il rapporto di partizione K_p del partitore al valore che avrebbe sull'elettrodo flottante ed epurato del contributo dell'alta tensione in quel punto

$$V_{dep_{partitore}} = \frac{V_{out}}{K_p} - V_{HV} * K_r$$

$$Q_{dep_{partitore}} = V_{dep_{partitore}} * C_k$$

4. Integrale della corrente

La carica è stata anche calcolata come integrale della corrente di plasma, per valutare se alla fine del periodo il bilancio tra corrente positiva e negativa, dovuta alla scarica è diverso da 0.

La configurazione con il voltmetro elettrostatico sull'elettrodo flottante è stata utilizzata solo alla tensione di 100 Hz, poiché a frequenze di 1-25kHz non riusciva bene a seguire le variazioni di tensione, a causa della sua banda.

Quindi il metodo 1) di rilevazione della carica è presente solo nelle analisi a 100 Hz, mentre a 1 e 25 kHz si è adoperato il condensatore di misura 2) e il partitore capacitivo in uscita al reattore 3). Per tutti è stato usato il metodo 4).

4.3.3. Foto della scarica tramite ICCD camera

Sono state realizzate delle foto con la fotocamera intensificata che permette di raggiungere tempi di esposizione nanometrici, per vedere dove si formava la scarica e per valutare che differenze vi erano tra le frequenze utilizzate.

In particolare per stimare la densità di carica come $\sigma = \frac{Q}{S}$ è necessario che il plasma sia uniforme nella regione prestabilita.

Le acquisizioni sono state svolte in modo da vedere un singolo streamer e molteplici eventi di scarica.

Per controllare la fotocamera si impongono il tempo di esposizione, un voltage gain (che rappresenta di quanto viene amplificata l'intensità luminosa sul sensore) e il trigger (ne nostro caso sul segnale di corrente proveniente dall'oscilloscopio).

100 Hz- $V_{in}=3.4kV$

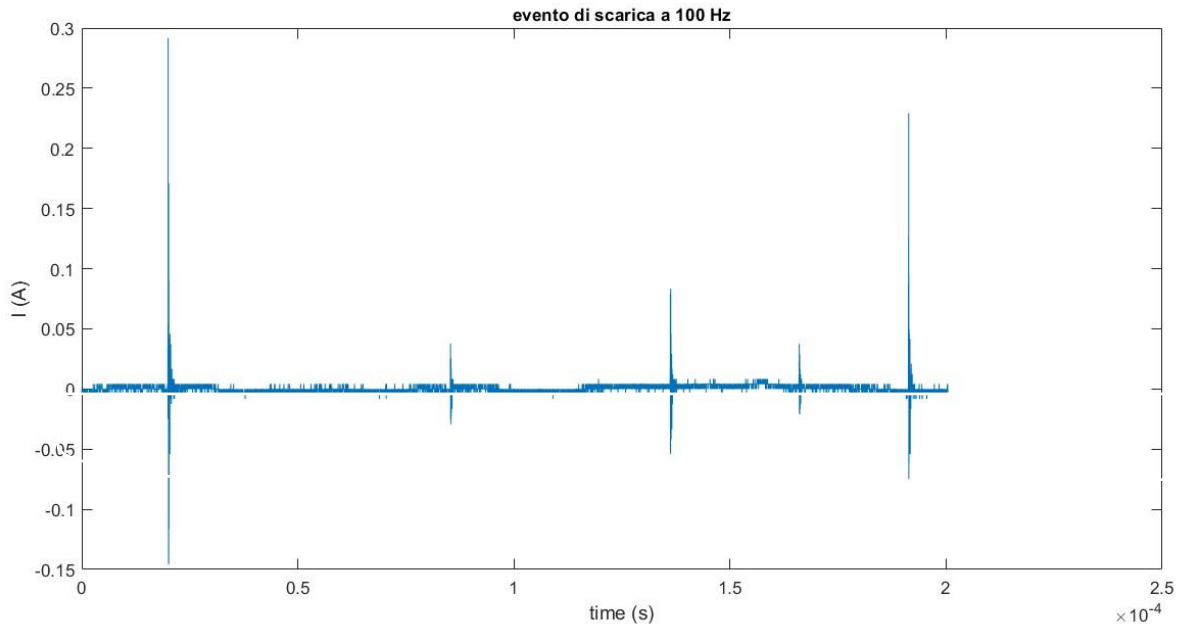


Figura 4.20: streamer di corrente con $f=100$ Hz

Dalla figura 4.20 si vede che la distanza temporale tra un evento di scarica rilevante e il successivo passano quasi $200 \mu s$, quindi per visualizzare un singolo evento di scarica ci si può porre ad esempio a $20 \mu s$. con gain 900.

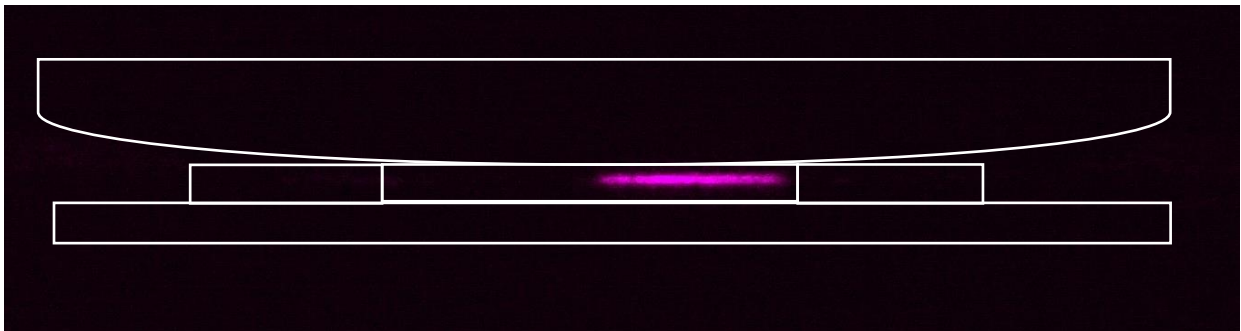


Figura 4.21: streamer a 100 Hz con $exptime=20\mu s$. Modellazione del reattore per far capire dove si verifica la scarica

La scarica si forma in una sola parte del reattore, di solito quella di destra, perché probabilmente il gap di scarica è inferiore.

Con un tempo di esposizione di $100 \mu s$ e gain 900, la scarica si forma in modo uniforme in tutto il gap e si nota che contrariamente a quanto supposto inizialmente si forma anche sotto il mylar.

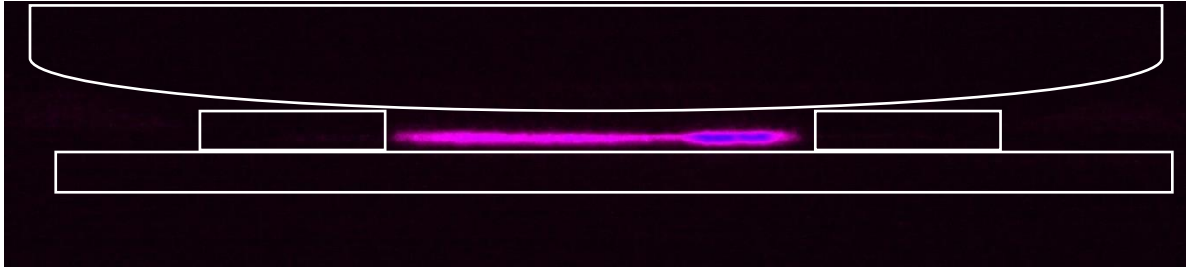


Figura 4.22: scarica a 100 μ s e gain 900, uniforme nella regione di scarica

1 kHz-2.8kV

A 1 kHz, la distanza media tra due impulsi è di 10 μ s, quindi assumendo un tempo di esposizione di 5 μ s si può vedere l'effetto di una sola scarica.

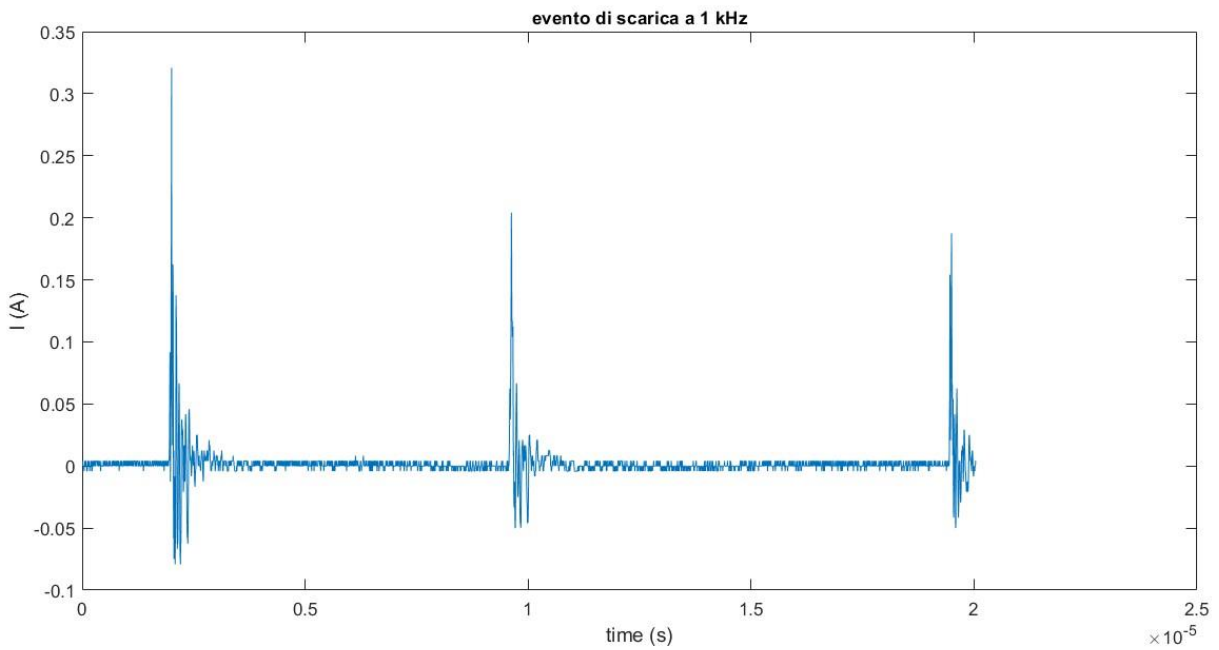


Figura 4.23: streamer di corrente con $f=1$ kHz

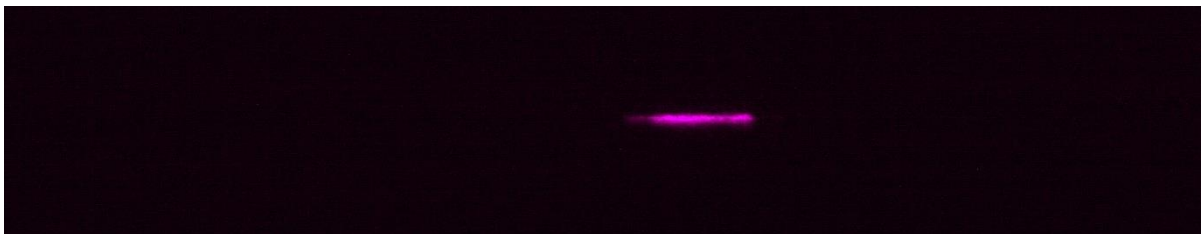


Figura 4.24: 1 kHz, $V_{in}=2.8$ kV, $exptime=5\mu$ s gain 900

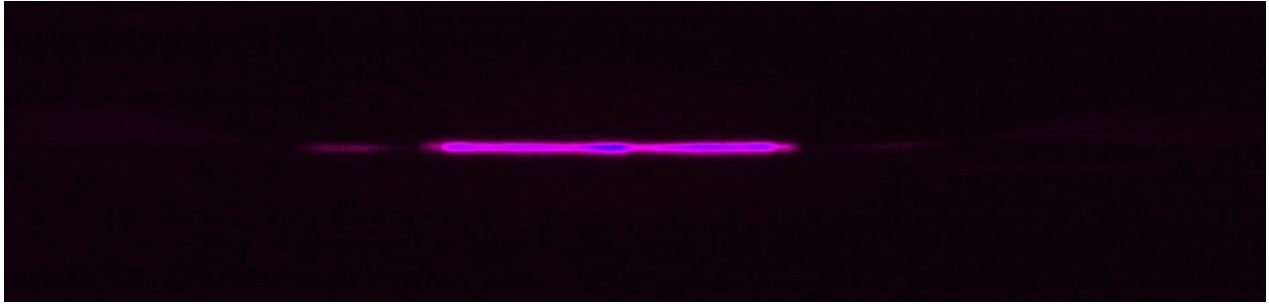


Figura 4.25: scarica a 1kHz, $V_{in}=2.8$ kV, $exptime=200$ us e $gain=750$

Con un'esposizione di 200 μ s si acquisiscono circa 20 impulsi ed è molto evidente che la scarica è molto intensa ed omogenea e si illumina, seppur meno intensamente anche sotto il mylar.

25 kHz-2.8 kV

A questa frequenza il periodo è 40 μ s e dal grafico si vede che vi è una scarica all'incirca ogni 1 μ s, quindi con un tempo di esposizione di 0.5 μ s si può cogliere un solo streamer.

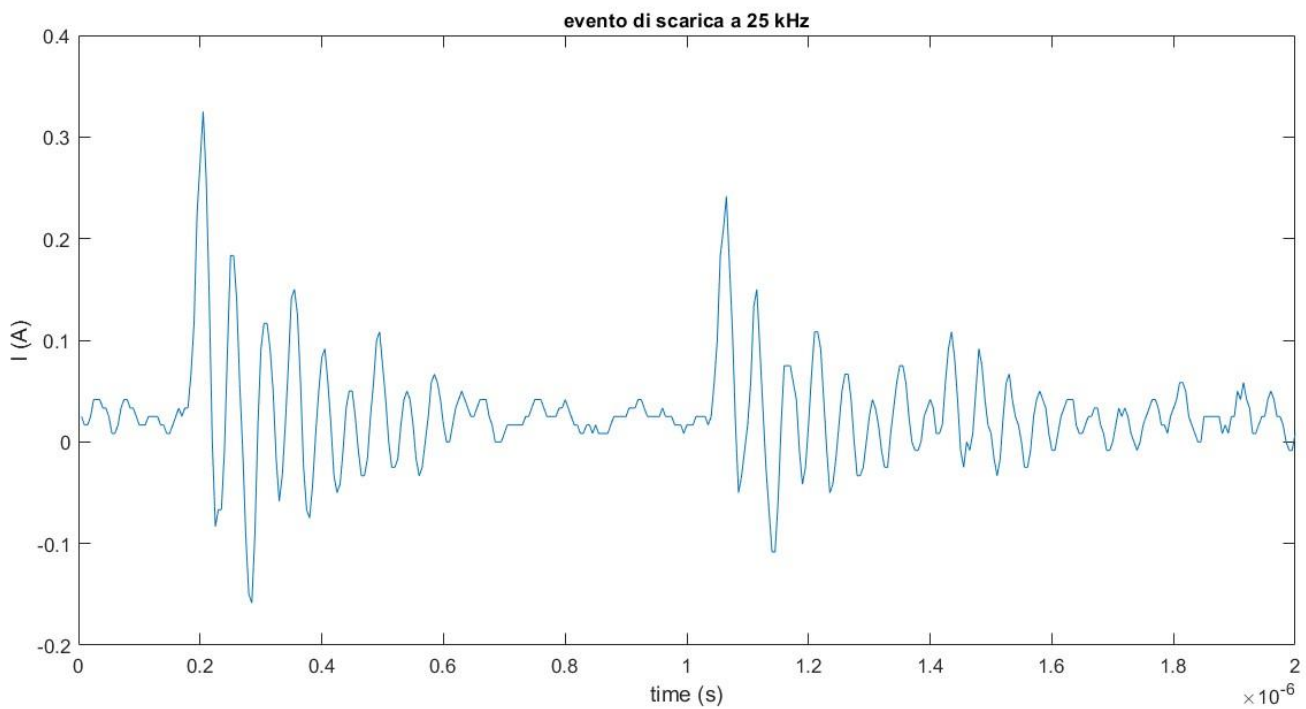


Figura 4.26: streamer di corrente con $f=25$ kHz



Figura 4.27: 25 kHz, $V_{in}=2.8kV$, $exptime=0.5\ \mu s$, gain 900



Figura 4.28: $f=25kHz$, $V_{in}=2.8kV$, $exptime=3\ \mu s$, gain 750

Con un tempo di esposizione di $3\ \mu s$ si possono cogliere all'incirca 3 streamer, infatti l'immagine mostra una scarica molto uniforme, piú intensa nella regione dove probabilmente il gap è inferiore. Inoltre si nota nuovamente che il plasma si forma sotto il mylar.

Quindi le immagini con a ICCD confermano che la densità di carica è uniforme nell'intervallo temporale considerato in questo setup sperimentale. Inoltre mettono in luce che la scarica non è confinata alla regione di aria prestabilito ma tende a formarsi anche al di sotto dei distanziatori di mylar, che hanno una superficie confrontabile con quella dell'elettrodo flottante.

4.3.4. Set up sperimentale con OPAMP

1. LMP7721

2. TL081

Una volta valutate le prestazioni con la sonda elettrostatica e la sonda di bassa tensione, si è deciso di introdurre l'opamp.

L'approccio con l'OPAMP, come già descritto precedentemente, è interessante per la sua elevata impedenza ingresso (idealmente infinita) ma anche per la sua banda nettamente superiore alla frequenza del plasma (decine di MHz), si veda la tabella.

Infatti la necessità è quella di fare misure idealmente "contactless", ma la sonda elettrostatica come mostrato precedentemente ha scarsa banda per inseguire i picchi di corrente e una qualsiasi misura con contatto elettrico drena le cariche o comunque la compromette. Quindi un OPAMP rappresenta idealmente un ottimo connubio tra le esigenze di banda e isolamento elettrico.

La misura può essere facilmente compromessa dal rumore elettromagnetico, dovuto all'elettronica di potenza, disturbi a 50 Hz, o anche alle stesse scariche di plasma.

Quindi per ottenere una misura affidabile è necessario che l'intero circuito di amplificazione sia schermato adeguatamente.

Inoltre è necessario un OPAMP che non faccia saturare la tensione di uscita, quindi con piccolissime correnti di bias.

Gli operazionali sono decisamente più economici e pratici delle sonde di tensione, anche in vista di misure spazio risolte a scarica spenta che necessitano di molteplici sensori.

Queste necessità hanno condotto alla scelta del LMP7721. Questo OPAMP ha 17 MHz di banda passante e una bassissima corrente di bias (± 20 fA) che viene ottenuta tramite un doppio circuito di schermatura che tiene l'ingresso invertente a una tensione circa pari a quella dell'ingresso non invertente. Questa configurazione garantisce anche la schermatura da vari disturbi elettromagnetici.

Sull'evaluation board acquistata è presente il LMP7721 ed è già montato il circuito di schermatura.

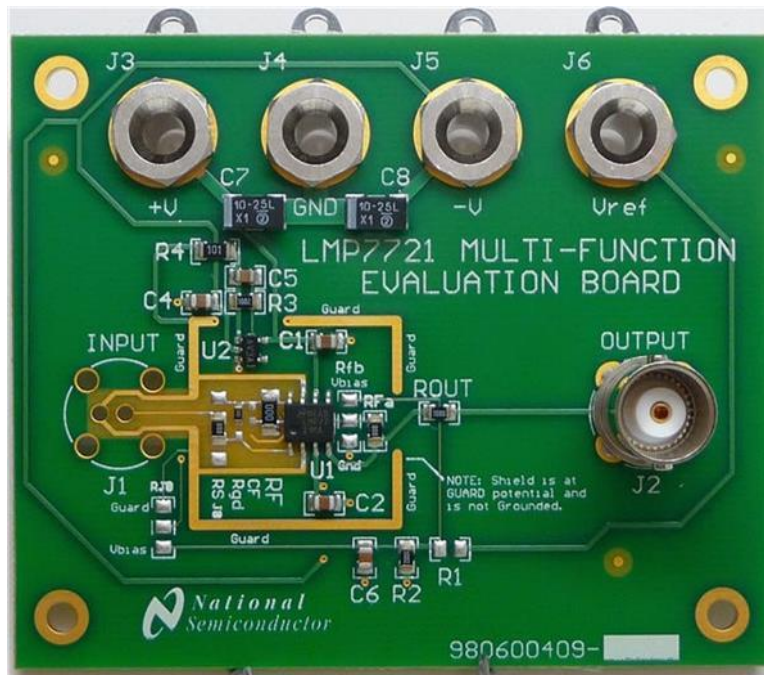


Figura 4.29:evaluation board con LMP7721

6.1 Hardware Schematic – Non-Inverting Configuration

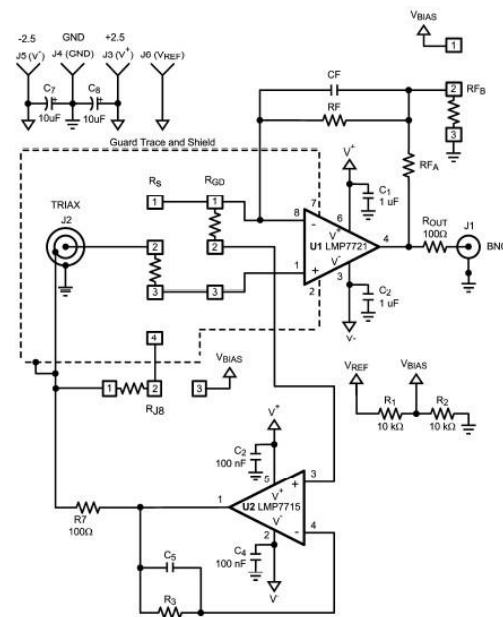


Figure 9. LMP7721 Multi-Function Evaluation Board Schematic (GND Referenced)

Figura 4.30:schema elettrico evaluation board

In figura 4.30 è mostrato il circuito equivalente della board, con il LMP7721 e il circuito di guardia realizzato dal LMP7715 in configurazione non invertente. Esso è stato alimentato, sono state connesse tutte le terre assieme e al COM dell'alimentatore.

La board è stata analizzata nelle sue prestazioni per valutare quanto fosse il suo guadagno, la sua banda, lo sfasamento ingresso-uscita introdotto a varie frequenze etc.

	Vin differenziale massima	Zin	Bandwidth
LMP7721	+/- 0.6 V	$10^{17} \Omega$	17 MHz

Una volta verificato il setup e un'opportuna ripartizione delle tensioni si è proceduto con il collegamento dell'OPAMP secondo la configurazione mostrata in figura 4.30.

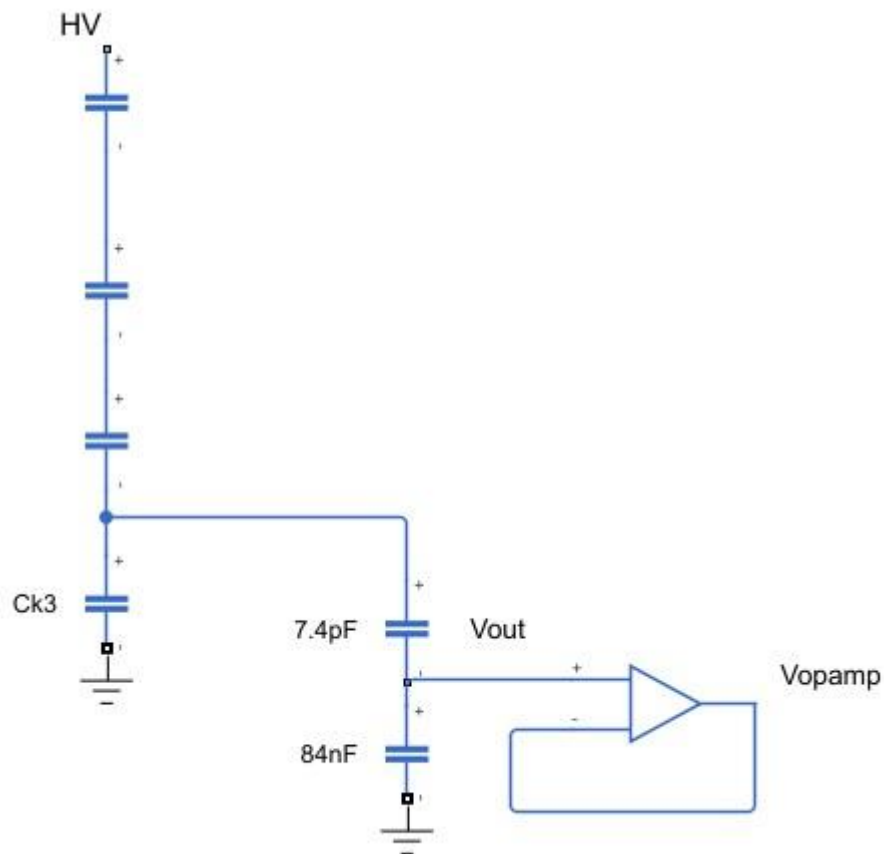


Figura 4.31: circuito equivalente intero setup con opamp in configurazione voltage follower

Per utilizzare al meglio la board, è necessario un triax che realizza la doppia schermatura.

Infatti come si vede in figura 4.29, il segnale di ingresso è schermato dalla parte metallica esterna del BNC.

In assenza di un triax si è semplicemente collegata la Vout all'ingresso + dell'OPAMP.

A causa di un guasto si è passati al TL081 che accetta in ingresso tensioni maggiori, ha comunque elevata impedenza di ingresso ($10^{12} \Omega$) e basse correnti di bias, ma maggiori del LMP7721 (20 nA).

	Vin differenziale massima	Zin	Bandwidth
TL081	+/- 30 V	$10^{12} \Omega$	4 MHz

Con questo amplificatore è stato possibile realizzare più test.

Sono stati introdotti due diodi Schottky per proteggere l'ingresso dell'OPAMP dalle sovratensioni del plasma. Infatti nonostante il valor medio della tensione fosse molto basso, i picchi dovuti all'innesco della scarica erano decine di volte superiori provocando l'immediata rottura del TL081.

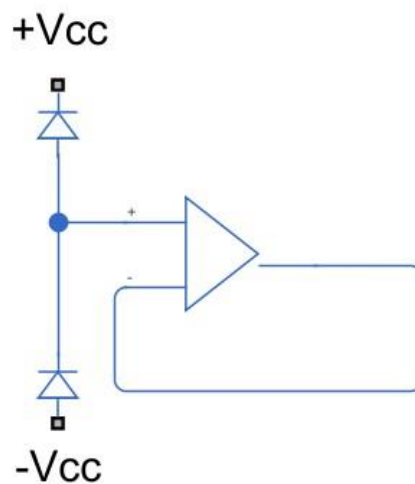


Figura 4.32: opamp con ingresso + protetto da diodi Schottky

Sono state provate configurazioni da voltage follower, invertente, non invertente e amplificatore di carica. Infine è stato inserito anche un filtro passabasso in ingresso all'opamp.

5. Descrizione dei risultati ottenuti

5.1. Simulazione FEMM della ripartizione della tensione sul reattore

È applicata una tensione di 1V all'elettrodo HV, è imposta la terra.

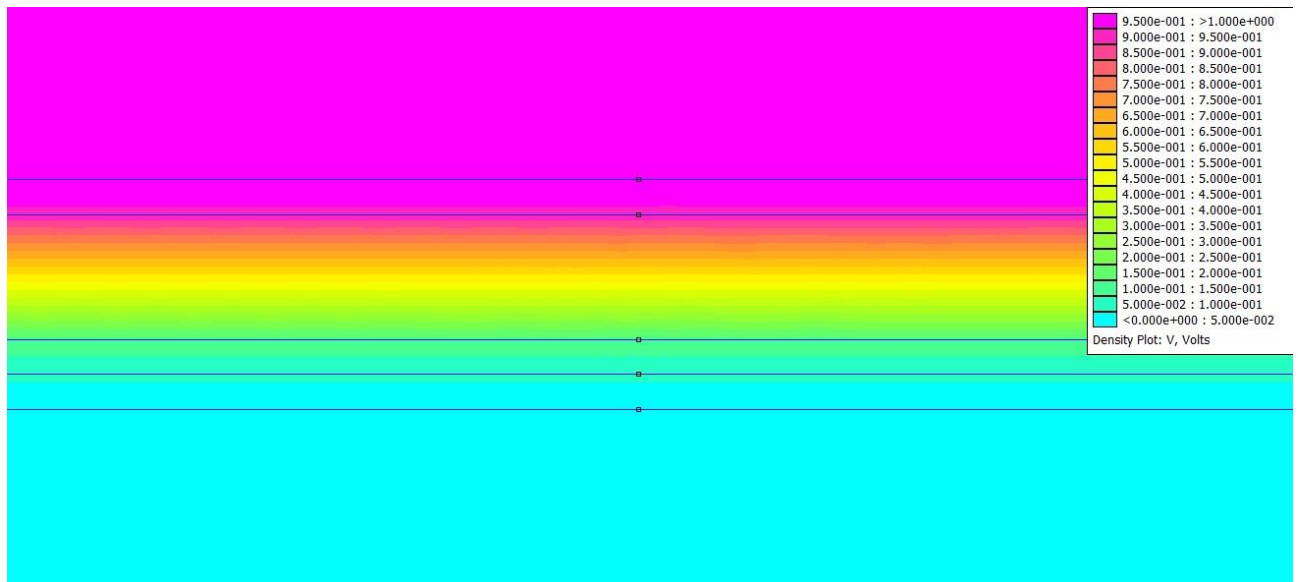


Figura 5.1: risultati modello FEMM della tensione sul reattore

Macroscopicamente si vede come si ripartisce la tensione, applicando 1 V all'elettrodo HV e imponendo la terra, pertanto la legenda riporta valori in per unità.

In figura 5.1 è mostrato l'andamento della tensione sui vari strati del reattore.

Passando da un materiale ad un altro cambia la pendenza della retta. L'ultimo tratto rappresenta la tensione sull'ultimo strato di kapton, cioè quello in uscita al reattore (V_{sonda}) che è circa $0.066/1=6.6\%$ della V_{in} .

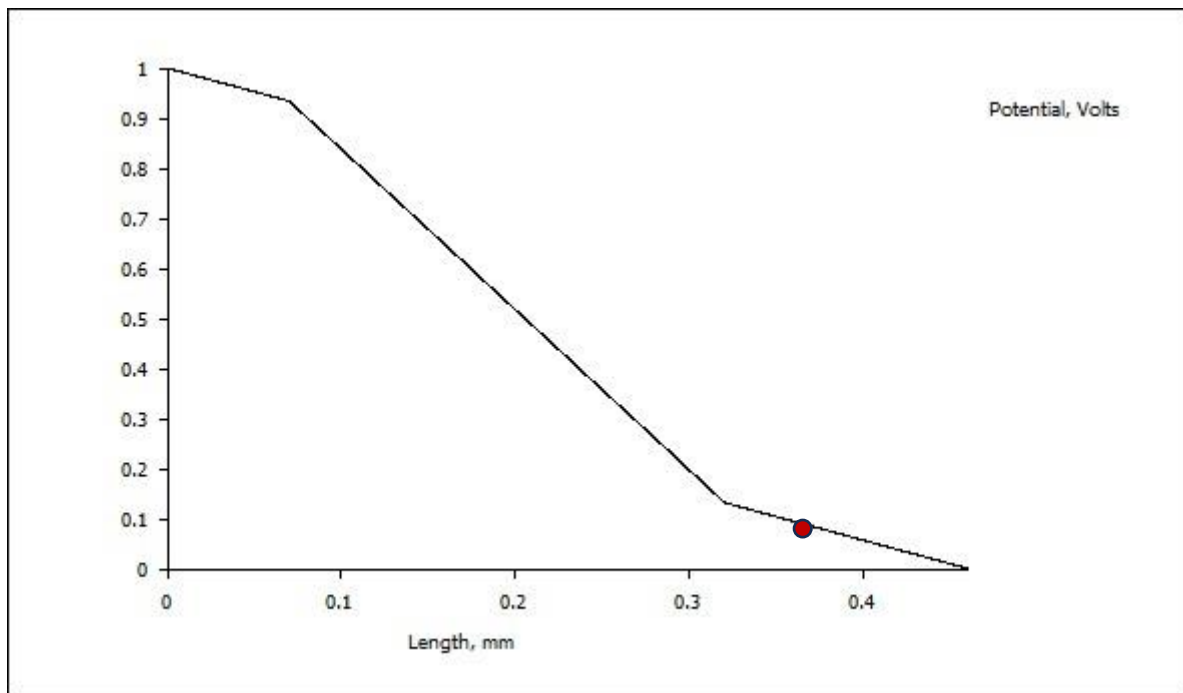


Figura 5.2: andamento tensione in funzione della distanza dall'elettrodo HV

Come introdotto precedentemente, alimentando la scarica con tensioni di diversi kV, si evince dalla simulazione che la tensione V_{sonda} è ancora troppo alta per essere applicata direttamente all'opamp o essere acquisita dalla sonda LV (2000V*0.066=120 V c.a.).

È importante notare che anche nelle configurazioni senza opamp è necessario avere il partitore perché la tensione sull'elettrodo flottante potrebbe eccedere i valori della massima tensione ammissibile della sonda LV. Inoltre il condensatore permette di non drenare le cariche che si depositano, ma anche perché in attività passate la sonda LV non misurava nulla se posizionata esattamente sull'uscita del reattore.

5.2. Risultati a 100 Hz

5.2.1. Caratterizzazione della scarica

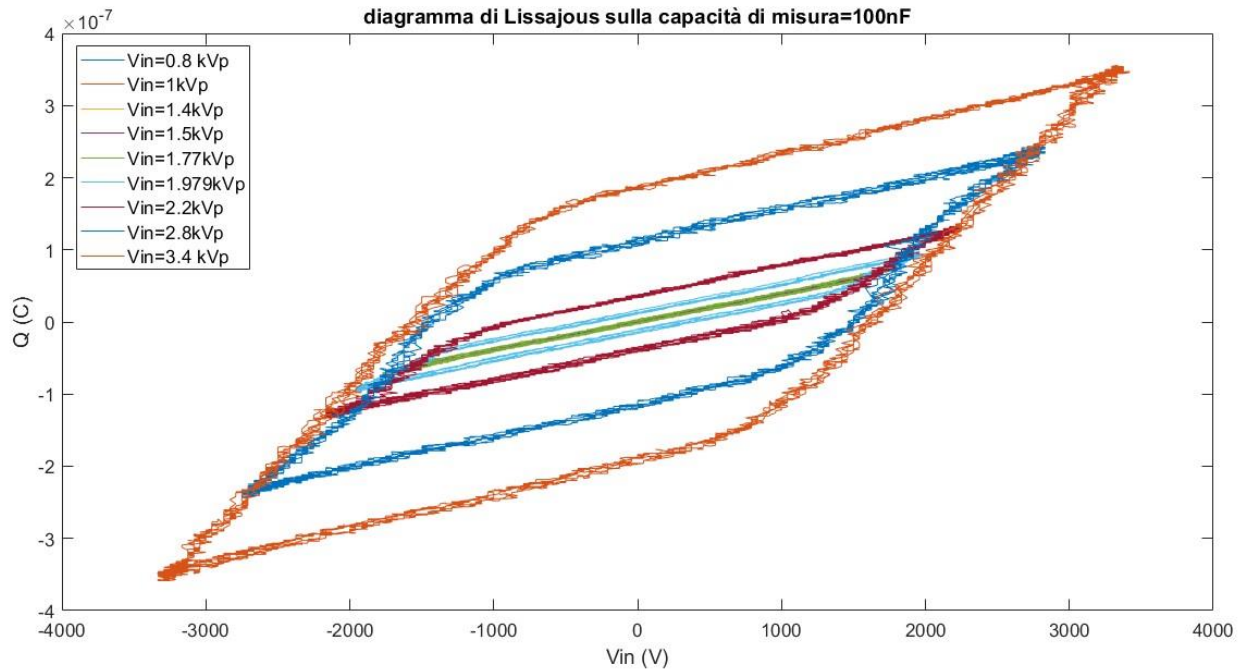


Figura 5.3:diagramma di Lissajous $f=100\text{Hz}$

Il diagramma di Lissajous mostra la carica ai capi del condensatore di misura in funzione della tensione di alimentazione.

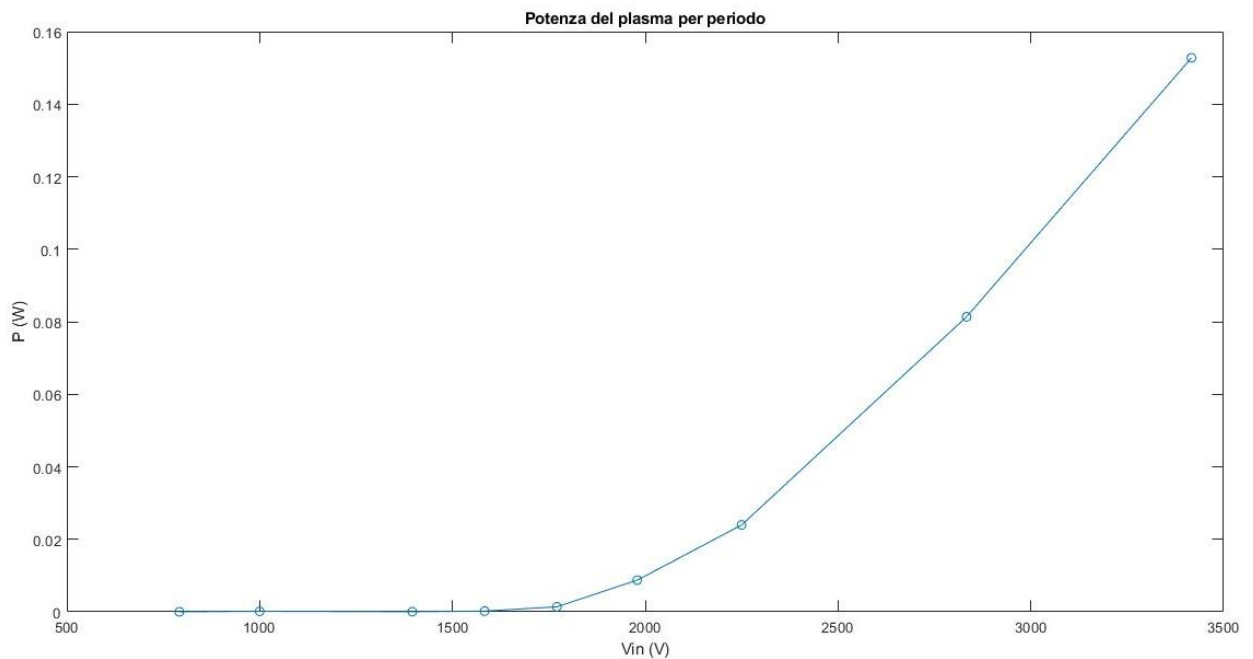


Figura 5.4:potenza trasferita alla scarica alle varie tensioni di alimentazione

$$Q = C_{mis} * V_{cond_mis}$$

L'area del ciclo di isteresi è associata alla potenza trasferita alla scarica.

In questo caso l'innesco è intorno a $V_{in}=2\text{kV}$ e l'area del ciclo aumenta all'aumentare della V_{in} . Ciò è confermato dal grafico della potenza che è nulla fino a 1.7-1.8 kV.

È interessante notare che l'area del ciclo è diversa da 0 se la pendenza del segmento varia, ossia se varia la capacità del reattore. Ciò significa che quando si accende il plasma vi è una variazione di carica netta rispetto a quella che si avrebbe con la stessa V_{in} ma senza scarica. Infatti il reattore è descritto elettricamente da una capacità, ma con l'accensione del plasma vi è una deposizione di carica ulteriore che non viene "restituita" con l'abbassamento della tensione sinusoidale, come avverrebbe in un normale condensatore.

Il valore della capacità quando la scarica è spenta è mostrato in figura 5.5 e aumenta leggermente all'aumentare della tensione di alimentazione. Probabilmente perché ci sono delle cariche che rimangono depositate anche durante gli intervalli di plasma spento. Essa rimane costante e pari circa a 39 pF fino all'innesco, per aumentare fino a 48 pF a 3.4 kV, che è coerente con il leggero aumento della pendenza del Lissajous.

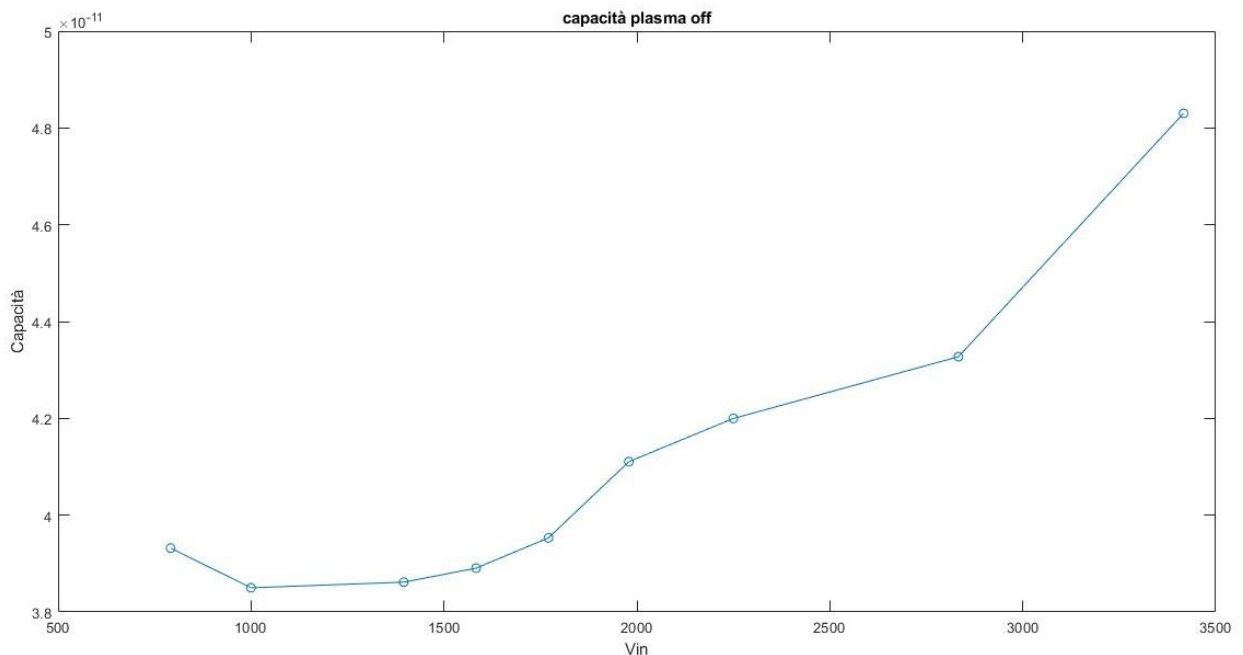


Figura 5.5: capacità del plasma a scarica spenta calcolato come pendenza del diagramma di Lissajous

Lo stesso grafico è stato realizzato per la capacità a scarica accesa, che è di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella a scarica spenta, in particolare è stata calcolata nell'intervallo in cui la pendenza del Lissajous varia, ossia nel range di tensione per la quale vi è plasma. Essa è perciò la capacità associata alle cariche depositate.

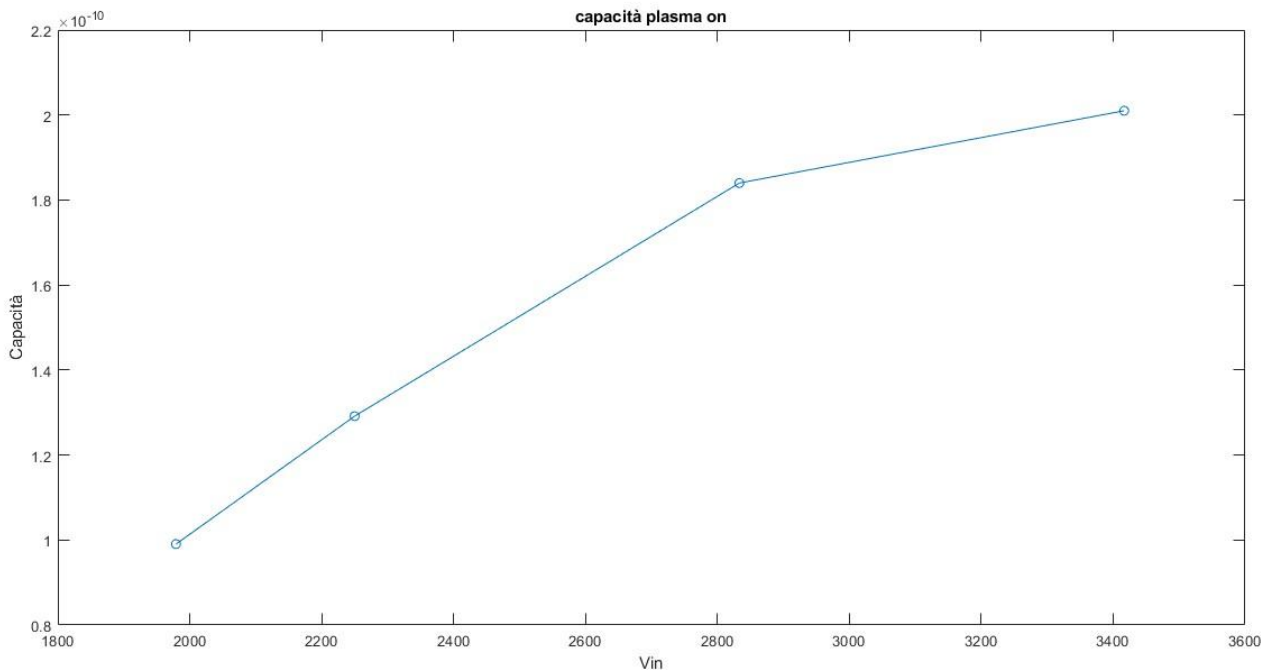


Figura 5.6: capacità del plasma a scarica accesa, calcolato cioè come pendenza del diagramma di Lissajous quando Vin supera la tensione di innesco

Dal diagramma della capacità a plasma acceso sembra che questa saturi intorno ai 3 kV, ma servirebbero più punti per avere una misura affidabile.

Il grafico della tensione sull'elettrodo flottante misurata con il voltmetro elettrostatico dimostra che la tensione si ripartisce sui vari strati di dielettrico del reattore come simulato.

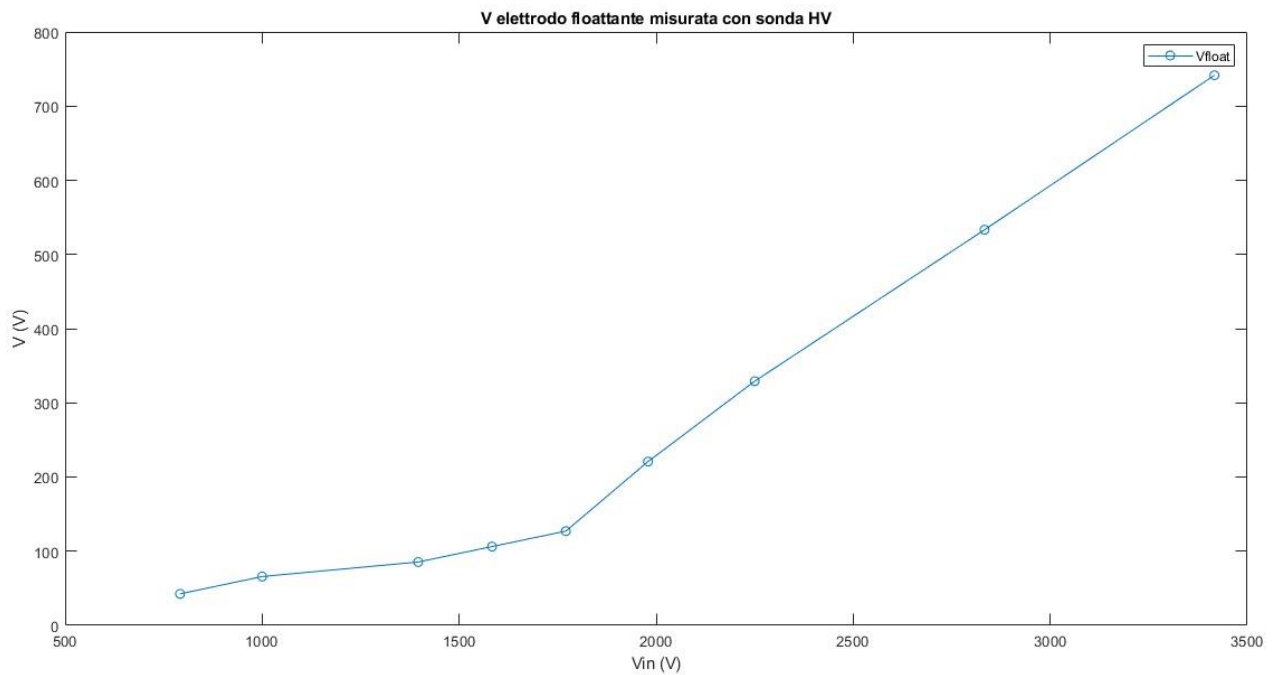


Figura 5.7: tensione sull'elettrodo flottante misurata con il voltmetro elettrostatico

La pendenza della retta in figura 5.7 varia all'innescio della scarica, quindi il set up realizzato rileva la deposizione di carica come desiderato.

5.2.2. Caratterizzazione del setup

Si è verificato inizialmente che la misura con il voltmetro elettrostatico su V_sonda non è influenzata dal partitore, attraverso una misura con il partitore connesso a terra e una flottante.

Questo è dovuto al fatto che $C_{k3} = 204 \text{ pF}$ su cui si misura V_sonda è molto maggiore dei 7.4 pF del partitore, quindi il rapporto di partizione rimane invariato come desiderato.

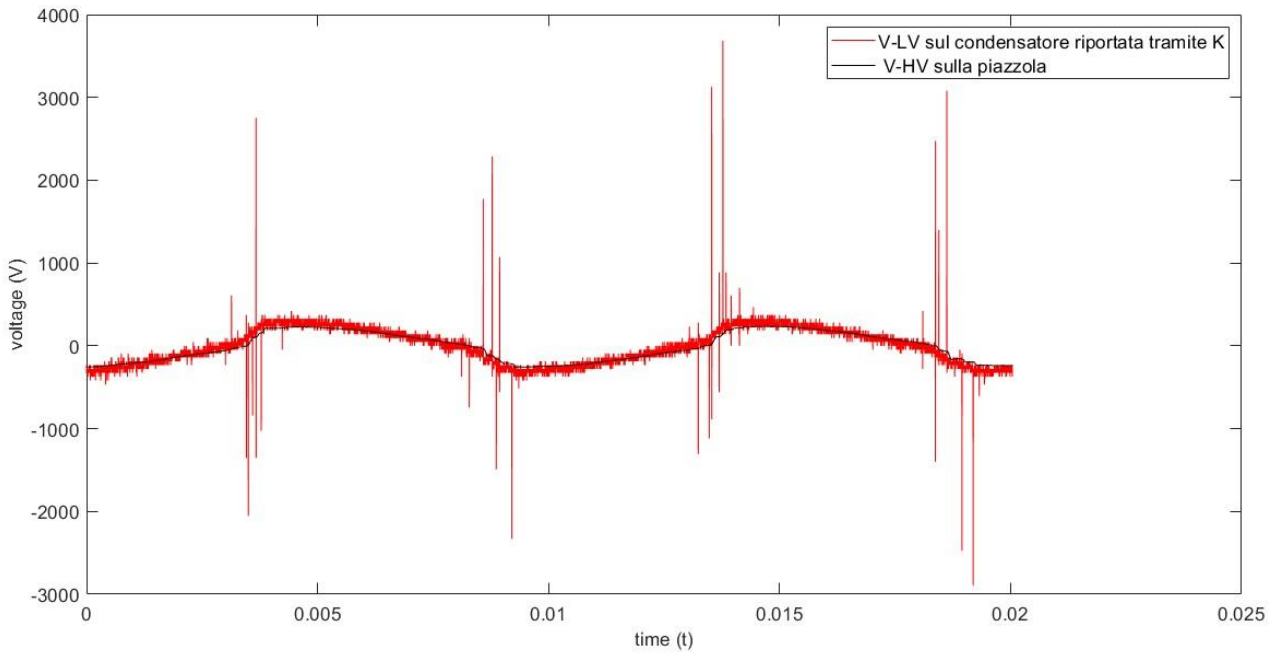


Figura 5.8: confronto tensione con voltmetro elettrostatico e tensione riportata alla piazzola di misura con K_p

È molto evidente dalla figura 5.8 che la il voltmetro elettrostatico e la sonda LV seguono lo stesso andamento medio, ma il primo non insegue bene gli streamer che vengono rilevati dalla seconda, per le ragioni di banda descritte precedentemente.

Andando a filtrare il segnale con un passa basso in post processing, per vedere meglio l'andamento medio (fig. 5.9), si nota che l'andamento della tensione misurato sulla piazzola decresce più lentamente rispetto a quello rilevato dalla sonda LV. Ciò potrebbe essere causato dall'impedenza verso terra della sonda LV che, nonostante il partitore capacitivo, porta via delle cariche mentre le misura. L'altra sonda invece, essendo senza un vero e proprio collegamento elettrico si carica elettrostaticamente e segue la deriva temporale vera e propria delle cariche.

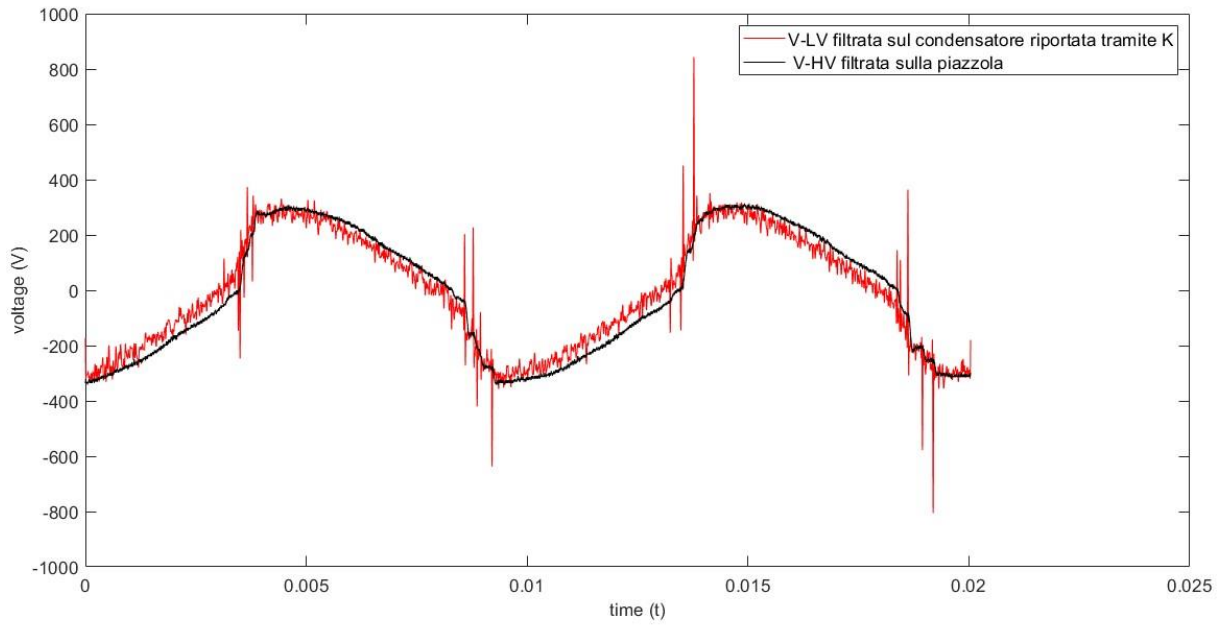


Figura 5.10: tensione misurata con il voltmetro elettrostatico e tensione dal partitore capacitivo riportata alla piazzola tramite Kp (filtrate)

Ciò suggerisce che questa configurazione funziona per misure a scarica accesa, in cui la deposizione di carica è continua, ma non può essere sfruttata per misure a scarica spenta.

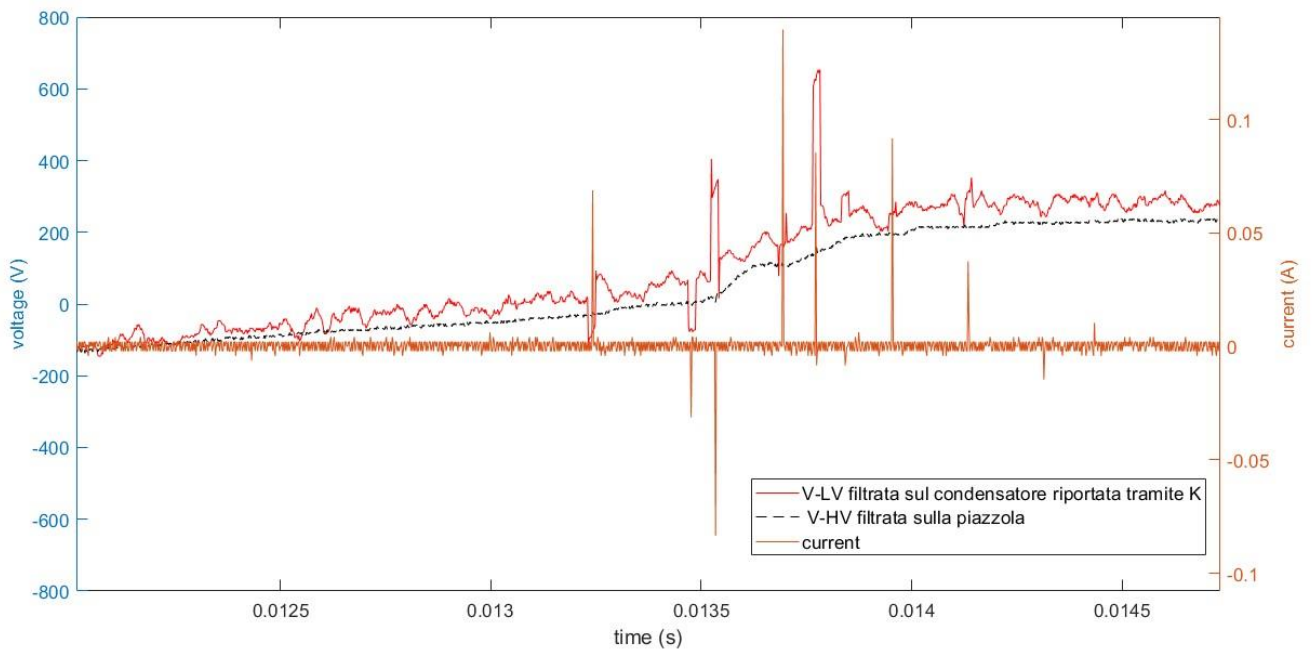


Figura 5.9: tensione voltmetro elettrostatico, tensione partitore riportata tramite Kp, corrente per evidenziare la dinamica di scarica

Si nota dall'immagine 5.10 che è semplicemente uno zoom di quella precedente, che la tensione misurata con la sonda LV però non sembra essere correlata al segno dello streamer di corrente. Infatti in alcuni casi a un picco positivo di I, corrisponde uno positivo di V, in altri casi viceversa. Questo è evidente anche dalle stime di carica che verranno esposte nei paragrafi successivi.

5.2.3. Misure di carica depositata a scarica accesa

Il numero del tipo di stima sottostante fa riferimento a quelli descritti nel paragrafo 4.3.2.

1. Voltmetro elettrostatico

$$V_{carica_{dep}} = V_{sonda} - K * V_{HV}$$

$$\sigma_{dep} = V_{carica_{dep}} * \frac{C_{k3}}{S}$$

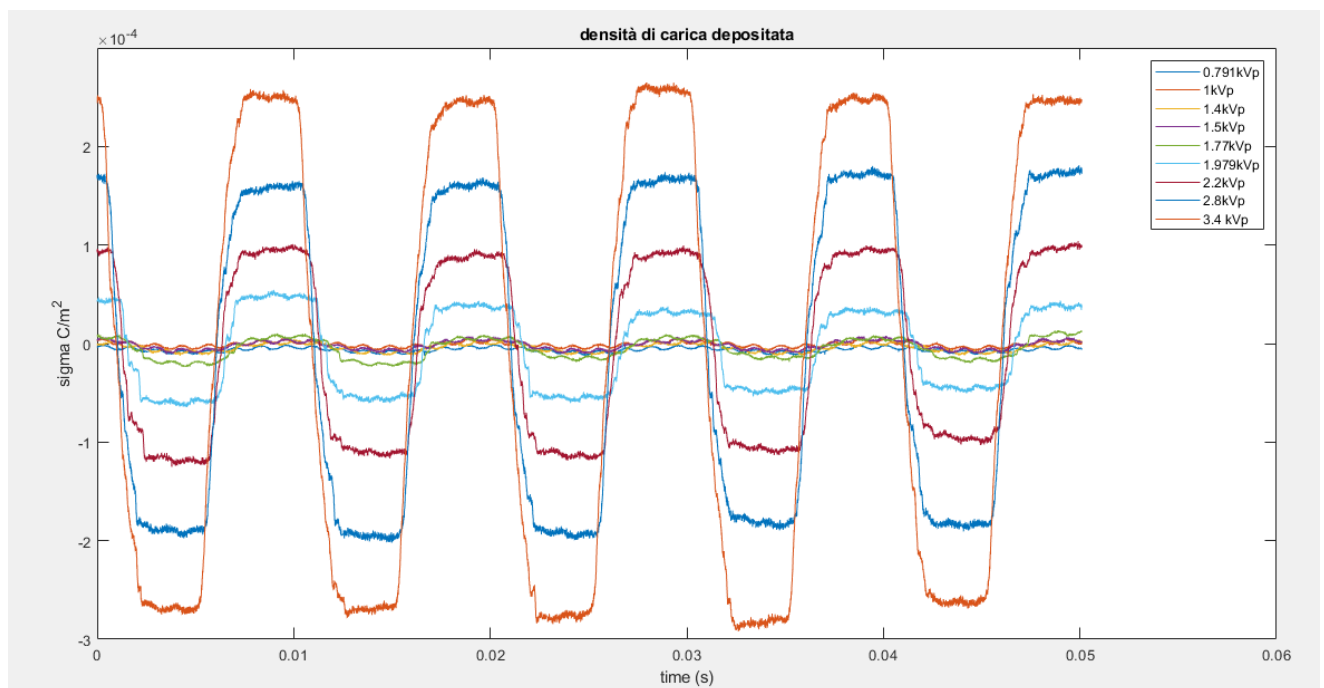


Figura 5.11: densità di carica in funzione del tempo a 100 Hz

Il grafico mostra che la deposizione di carica si innesca ogni volta che c'è la scarica e assume un valore costante.

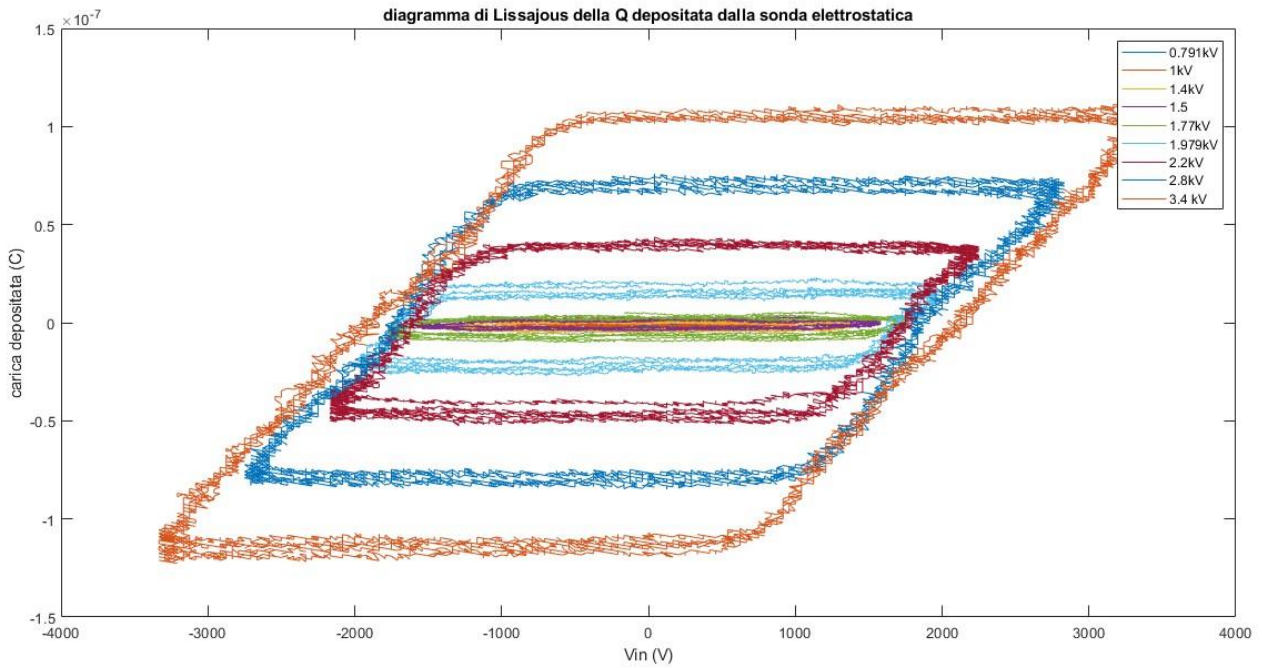


Figura 5.12:diagramma di Lissajous a 100 Hz della carica dalla misura di tensione con sonda elettrostatica

2. Condensatore di misura

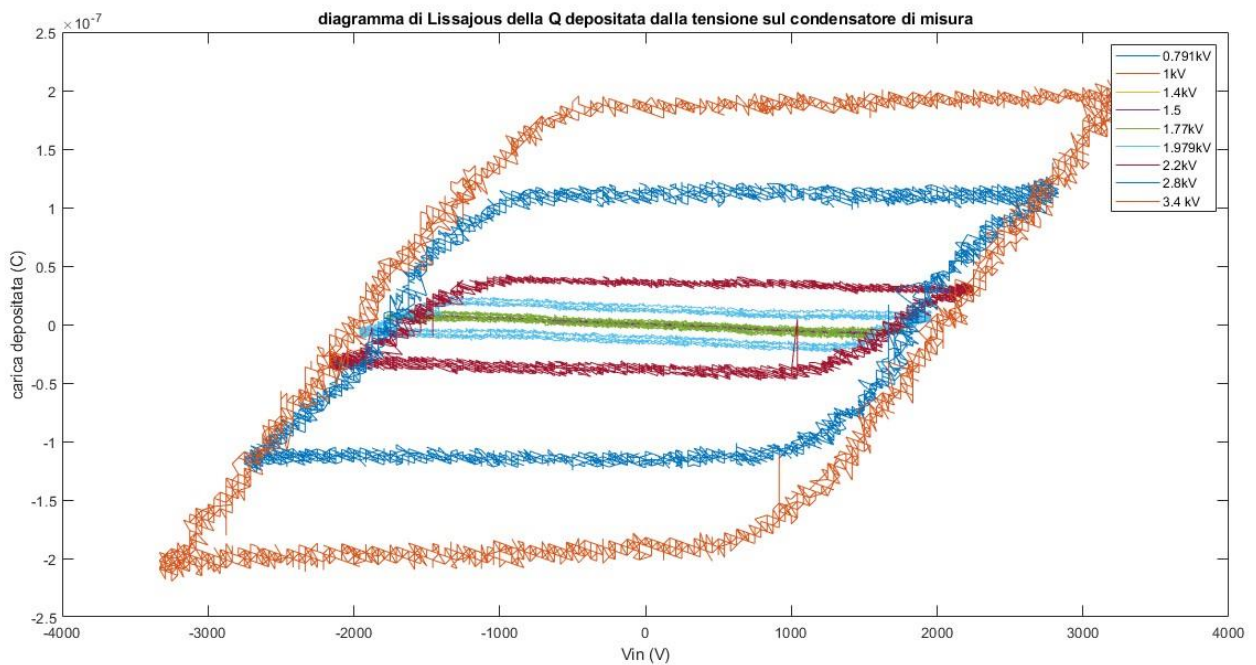


Figura 5.13:diagramma di Lissajous a 100 Hz della carica depositata stimata tramite il condensatore di misura

$$V_{carica-dep_{cmis}} = V_{cond-mis} - H * V_{HV}$$

$$Q_{dep-C_{mis}} = V_{carica-dep_{C_{mis}}} * C_{mis}$$

Si nota che la carica depositata è costante nei range di accensione della scarica e pari a circa 60 nC per la figura 5.12 e 120 nC dalla figura 5.13 per quella rilevata sul condensatore di misura per una $V_{in}=2.8$ kVp.

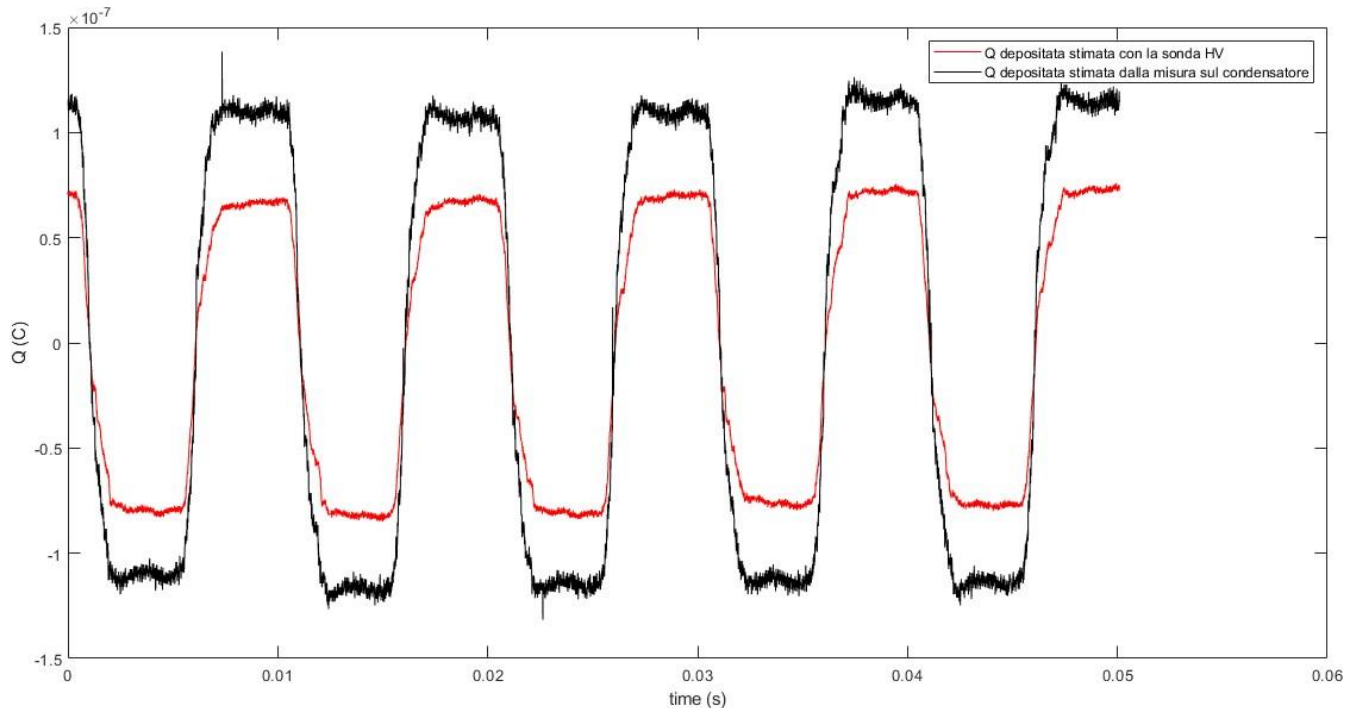


Figura 5.14: confronto carica stimata con sonda elettrostatica e dalla misura sul condensatore

Il grafico 5.14 mostra, per una $V_{in}=3.4$ kV, che la carica calcolata con il condensatore di misura è circa il doppio di quella stimata con il voltmetro elettrostatico. Ciò emerge sia nei diagrammi di Lissajous, sia nell'evoluzione temporale della carica. Questo risultato ricorre anche nelle misure a frequenza maggiore.

Le immagini con la fotocamera intensificata hanno messo in luce che il plasma si forma anche sotto i distanziatori di mylar che hanno una larghezza di circa 1 cm mentre la regione di scarica circa 2. Quindi la regione di scarica reale è doppia rispetto a quella inizialmente stimata. In definitiva, il voltmetro elettrostatico rileva la carica che si deposita unicamente sull'elettrodo flottante che ha un'area di circa 4 cm², mentre il condensatore di misura essendo in serie all'elettrodo di

bassa tensione rileva la carica che si deposita sull'intera superficie dielettrica, quindi anche al di sotto del mylar.

La discrepanza tra i due risultati dipende in minima parte anche dal fatto che la sonda HV non rileva interamente il potenziale della piazzola. Sarebbe quindi necessaria una taratura tramite una regressione lineare partendo da alcuni millimetri di distanza per estrapolare il valore della tensione a distanza nulla.

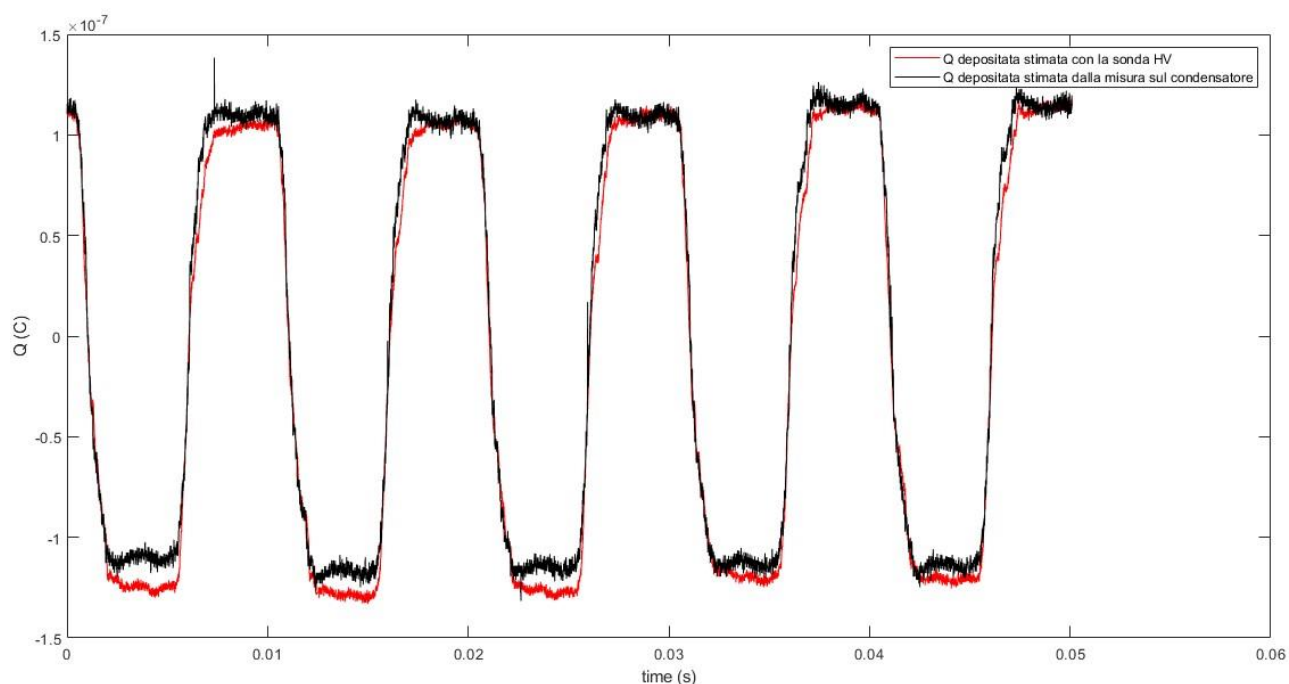


Figura 5.15: confronto Q con sonda elettrostatica e con condensatore di misura

Il grafico 5.15 mostra l'andamento della carica depositata in funzione del tempo stimata dalla misura della V_{sonda} e della $V_{\text{cond_mis}}$. Risulta evidente che le due forme d'onda sono molto simili, considerando che quella nera (V_{sonda}) è normalizzata per riportarla al valore di quella rossa. Ingrandendo l'immagine è chiaro che la sonda LV è più veloce nell'inseguire il segnale, inoltre nel semiperiodo negativo la sonda elettrostatica sovrastima la Q negativa (fig. 5.16).

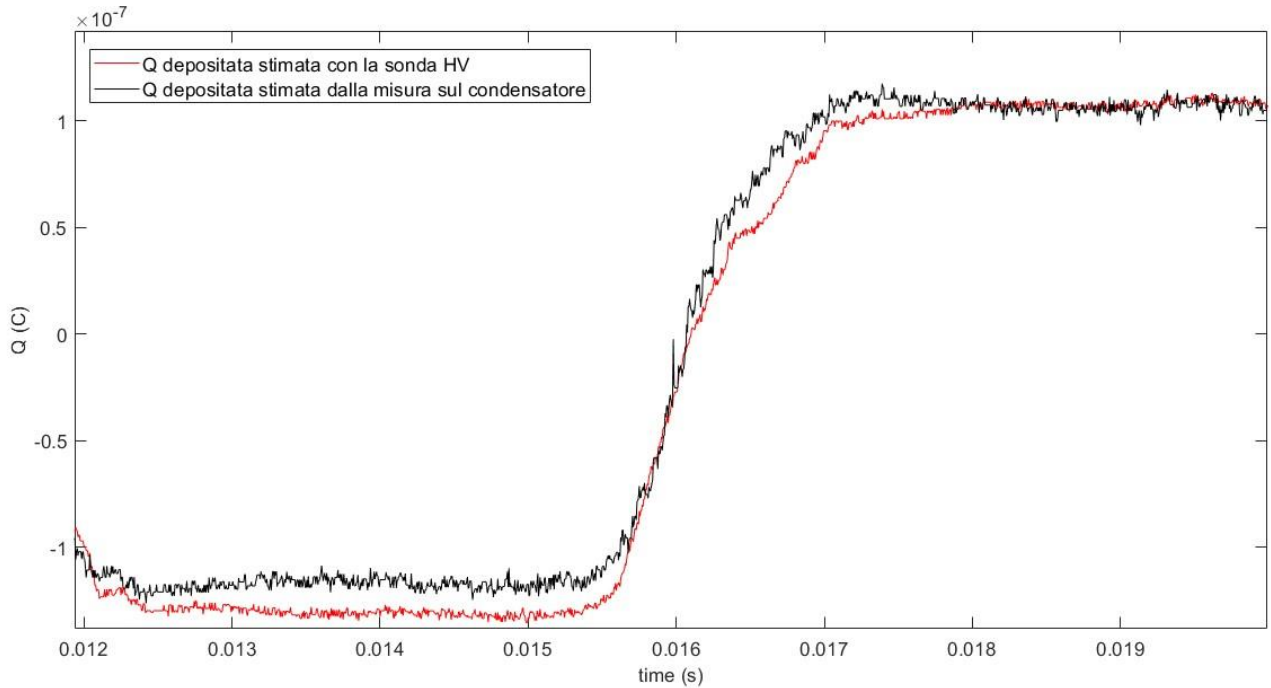


Figura 5.16: zoom della Q misurata con voltmetro elettrostatico e con condensatore di misura per evidenziare la dinamica

4. Integrale della Corrente e $Q_{dep_{partitore}} = V_{dep_{partitore}} * Ck$

Assumendo una risoluzione temporale $HR = 5e - 9$ s, l'obiettivo è quello di visualizzare un solo streamer per poter stimare il suo contributo sulla tensione rilevata dalla sonda LV sul condensatore.

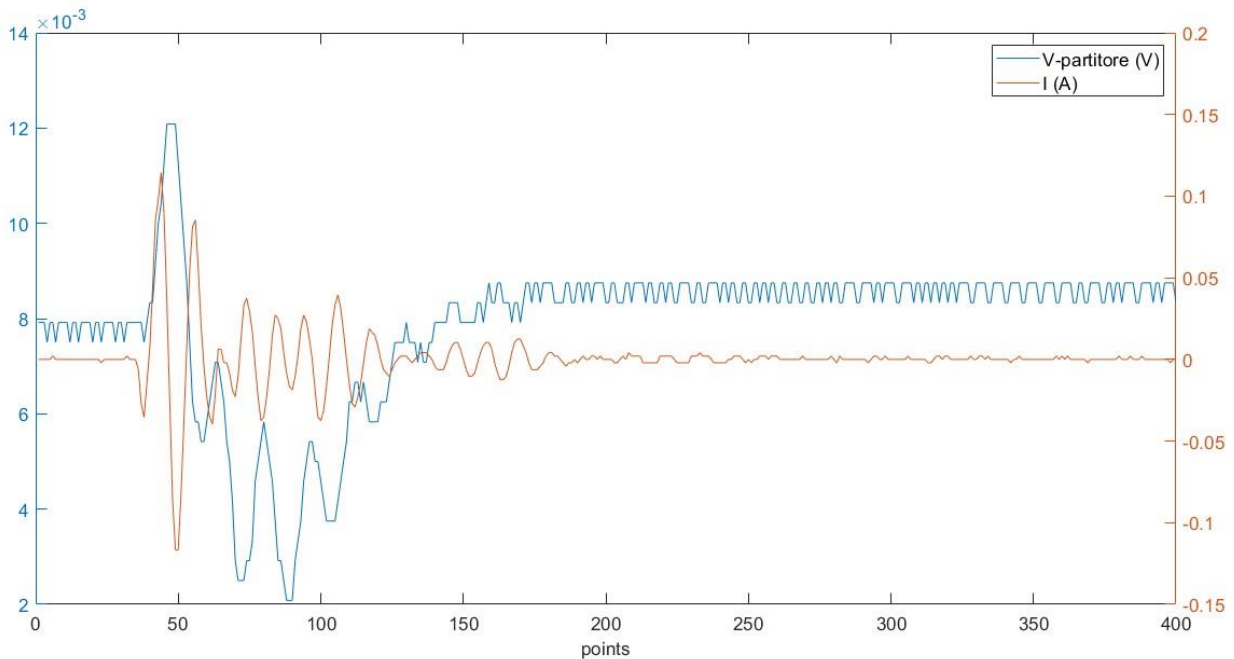


Figura 5.17: streamer di corrente a 100 Hz e conseguente aumento della tensione V_{out} sul partitore

La corrente oscilla molto, infatti non si riesce a capire quale sia lo streamer e quale invece sia la perturbazione apportata dalla sonda. Di conseguenza la tensione risente di questa oscillazione e subisce un rapido incremento all'inizio per poi sottoelungare e riassetarsi a un valore medio superiore a quello pre scarica. Inoltre non è possibile stabilire se la tensione sia in ritardo rispetto alla corrente, perché questa condizione risulta verificata solo dopo il primo picco.

Q_i è calcolata come integrale della corrente moltiplicata per l'HR, siccome l'acquisizione della corrente è per punti.

“b” nello script di Matlab è una matrice tridimensionale. $b(:,5,3)$ è il vettore colonna delle correnti per il file 3 che è quello alla tensione di alimentazione di 2.4 kV. La funzione trapz calcola l'integrale del vettore con il metodo dei trapezi.

$$HR = 5e - 9 s$$

$$Q_i = \text{trapz}(b(:,5,3)) * HR = 9.06e - 10 C;$$

L'aumento del valor medio della tensione V_{out} in quello stesso intervallo temporale dovuto alla scarica è riportato all'elettrodo flottante secondo il rapporto di partizione capacitivo. Il contributo netto della carica depositata Q_v è la tensione risultante moltiplicata per la capacità $C_k=204$ pF.

$$Q_v = \frac{(0.00875 - 0.007917)}{K_p} * C_k = 1.9e - 09 C;$$

I risultati ottenuti con le 3 misure di carica hanno lo stesso ordine di grandezza, ciò conferma l'accuratezza del metodo di misura seguito e la sua affidabilità.

5.2.4. Simulazione FEMM della carica depositata

Una volta calcolata la carica depositata sul dielettrico a contatto con l'aria nella regione di plasma, si è simulato nuovamente il modello elettrostatico, imponendo la

densità di carica ottenuta proprio su quello strato, per verificare che la tensione sull'elettrodo flottante ottenuta dalle misure corrispondesse con quella stimata tramite simulazione.

Si suppone che la densità di carica sia uniforme sul dielettrico.

Quindi la tensione HV nel modello è stata annullata, ma è stata imposta

$$\sigma = 1e - 4 C/m^2$$

e GND sul segmento più in basso come nei modello precedenti

Tale valore di σ corrisponde a $V_{in}=2.2$ kV.

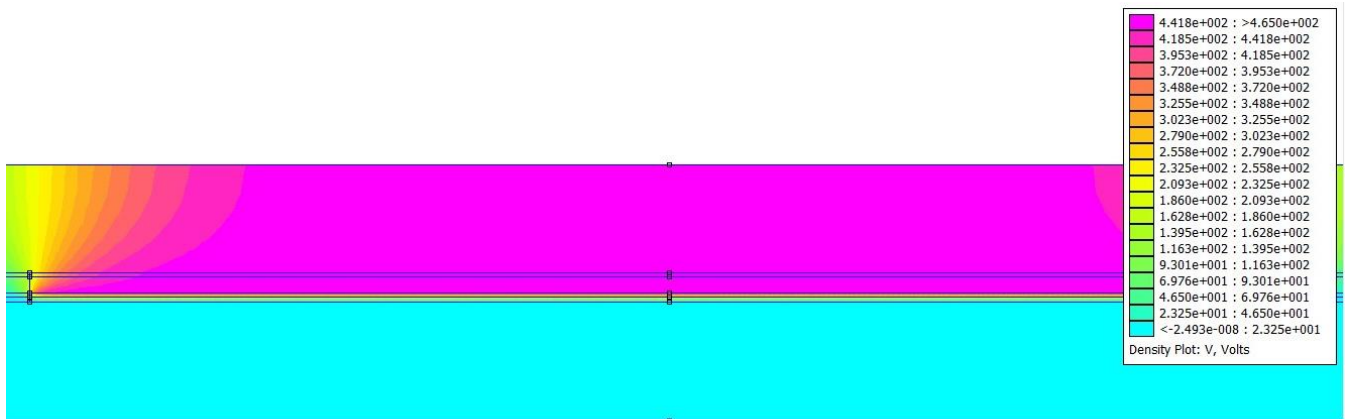


Figura 5.18:risultato tensione simulazione FEMM avendo imposto densità di carica

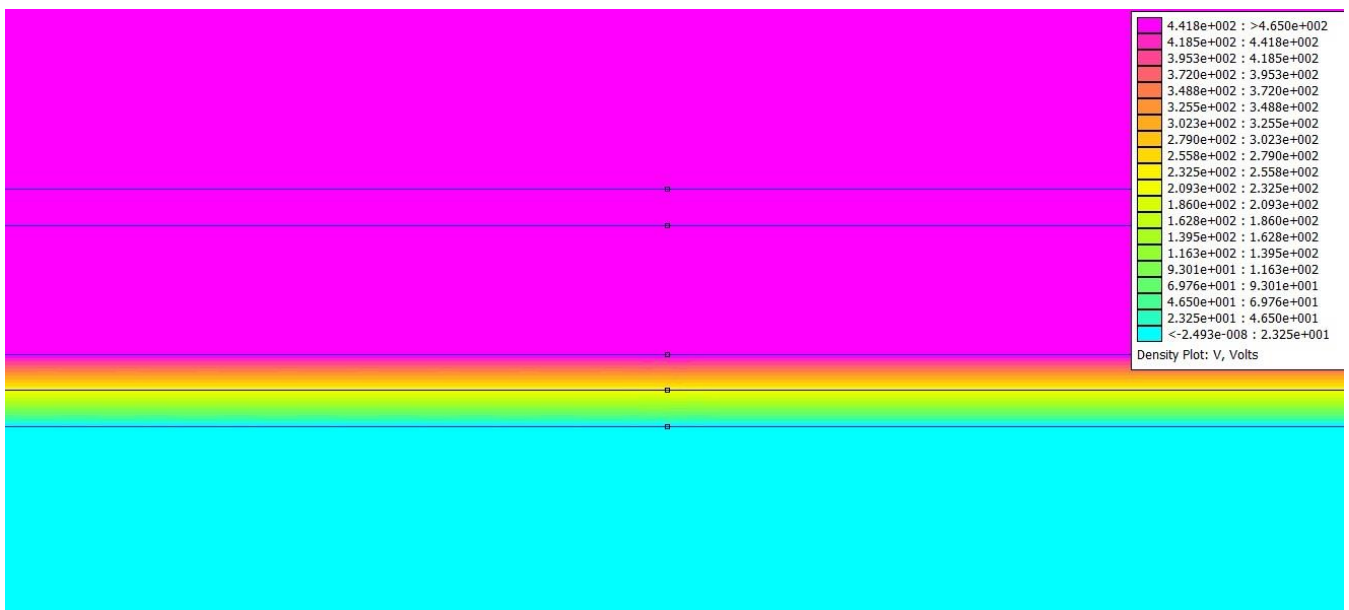


Figura 5.19: andamento tensione nel reattore da FEMM

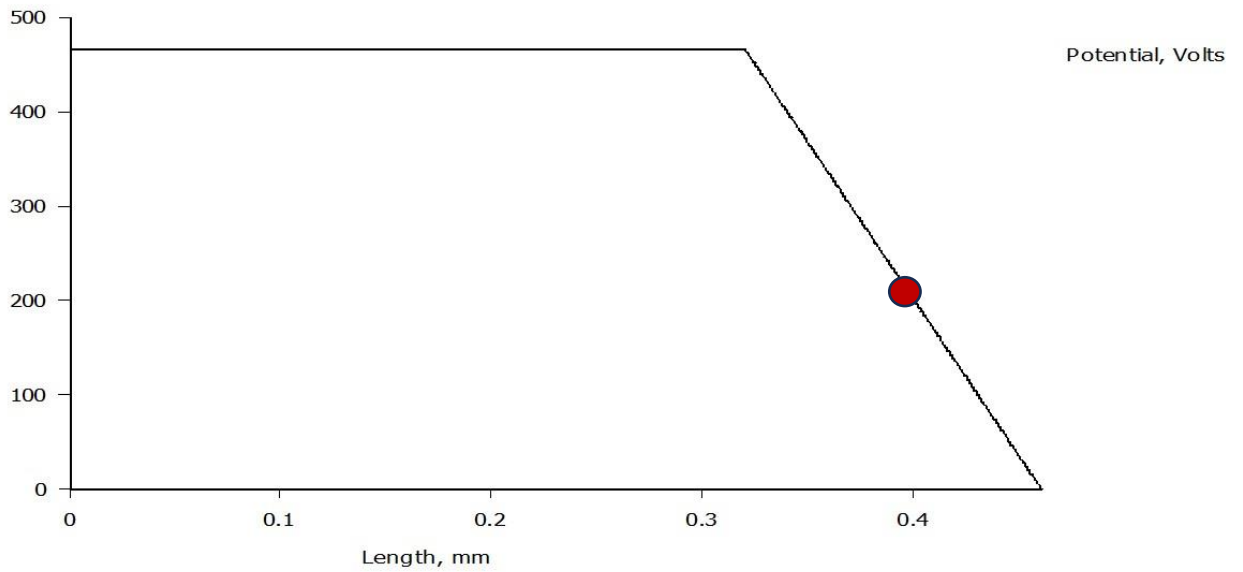


Figura 5.20: Evoluzione della tensione avendo in funzione della distanza dall'elettrodo HV

La tensione corrispondente a $V_{caricadep}$ dovuta alle cariche ma simulata è intorno ai 200 V.

Se $V_{HV}=2.2\text{kV}$ e $V_{caricadep}=200\text{ V}$, si può ritrovare il valore che dovrebbe avere la tensione rilevata sull'elettrodo flottante e che è stata misurata come:

$$V_{sonda} = V_{caricadep} + V_{HV} * K_p = 200 + 2200 * 0.062 = 329\text{ V}$$

Il risultato corrisponde con la misura eseguita con il voltmetro elettrostatico e mostrato in figura 5.7, confermando che la distribuzione di carica ottenuta è verosimile.

5.3. Risultati a 1 kHz

5.3.1. Caratterizzazione della scarica

Le misure effettuate a 100 Hz sono state replicate a 1 kHz.

In figura è mostrato il diagramma di Lissajous.

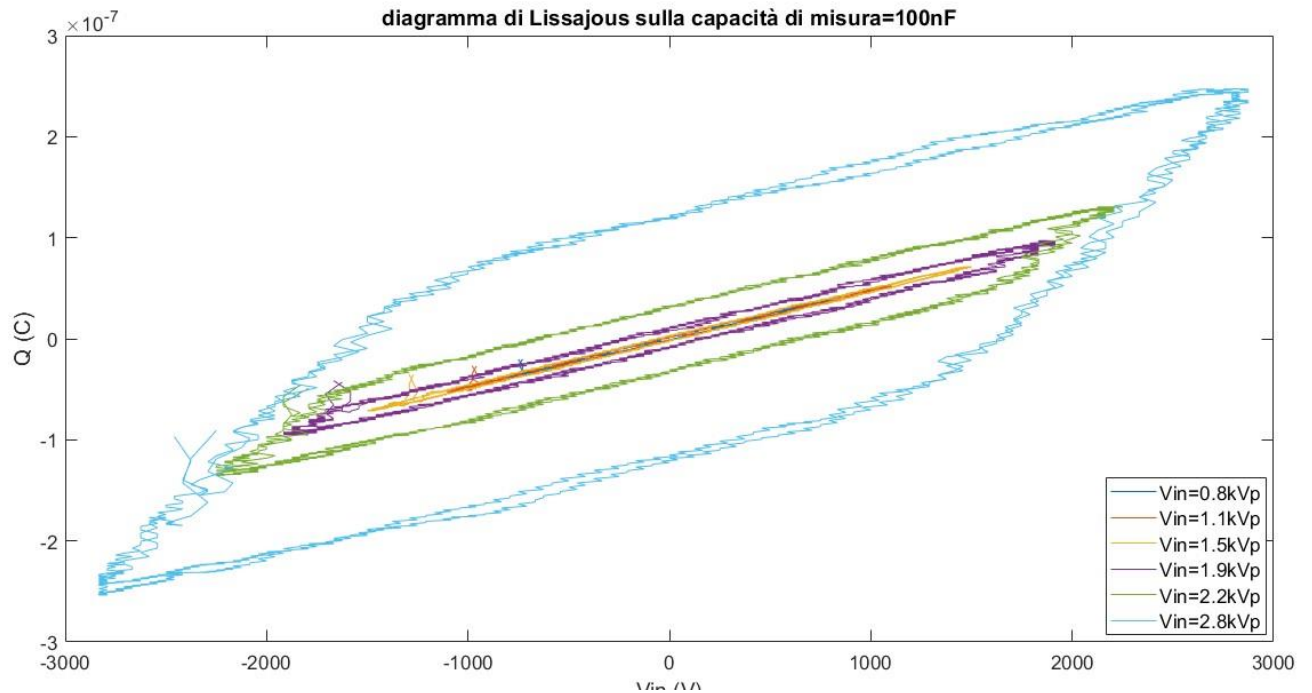


Figura 5.21: Diagramma di Lissajous a 1 kHz

Il diagramma di Lissajous risulta estremamente simile a quello a 100 Hz, infatti per una $V_{in}=2.8\text{kV}$, la carica oscilla per entrambe le frequenze considerate intorno ai $\pm 2 \cdot 10^{-7}\text{ C}$. La differenza tangibile è che l'andamento del grafico sembra oscillare di più nei tratti a tensione in cui si passa da V_{min} a V_{max} e viceversa.

La potenza iniettata nel plasma si mantiene pressochè nulla fino a 1.7 kV.

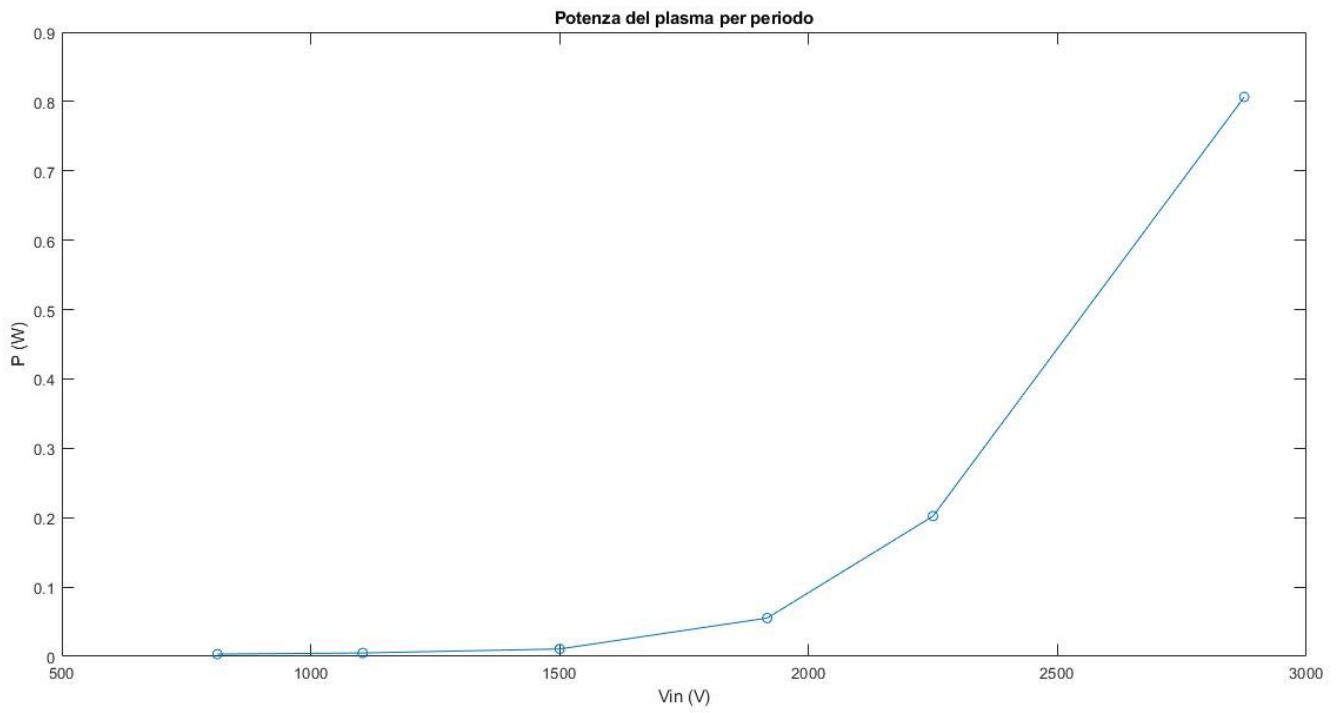


Figura 5.22: potenza a 1 kHz

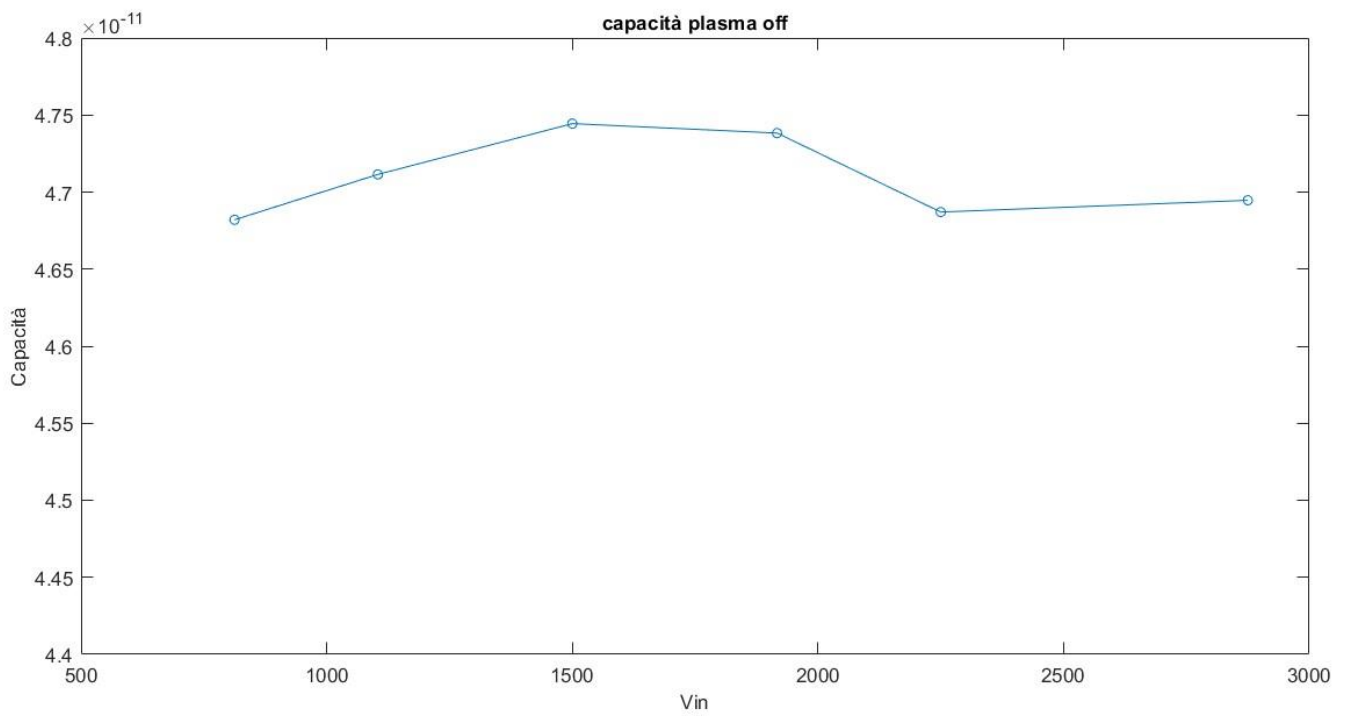


Figura 5.23: evoluzione capacità a scarica spenta a 1 kHz

L'andamento della capacità a 1 kHz mostra un'evoluzione con V_{in} diversa da quella a 100 Hz. In particolare, in figura 5.23 si vede che la capacità si mantiene intorno a 470 pF, indipendentemente dalla tensione di alimentazione.

Questo fenomeno potrebbe essere legato alla temperatura, infatti a 1 kHz il reattore comincia a scaldarsi. La conducibilità influenza il processo di accumulo di carica spaziale, l'andamento di quest'ultima infatti è funzione del gradiente della conducibilità. Nei polimeri la conducibilità è funzione di temperatura e campo. Nel modello adottato per simulare i fenomeni di interesse è stata utilizzata l'equazione seguente:

$$\gamma(T, E) = \sigma_0 * \exp(\alpha \cdot T) * \exp(\beta \cdot E)$$

Con $[T] = [^{\circ}\text{C}]$ ed $[E] = [\text{kV}/\text{mm}]$

Con α coefficiente di temperatura e β coefficiente di campo elettrico.

Quindi quando T aumenta, sigma aumenta moltissimo facendo migrare velocemente le cariche, che non sono più intrappolate dall'effetto capacitivo.

Questa ipotesi potrebbe essere verificata scaldando il reattore con una pistola termica e alimentandolo a 100 Hz, per vedere se si verifica un comportamento analogo.

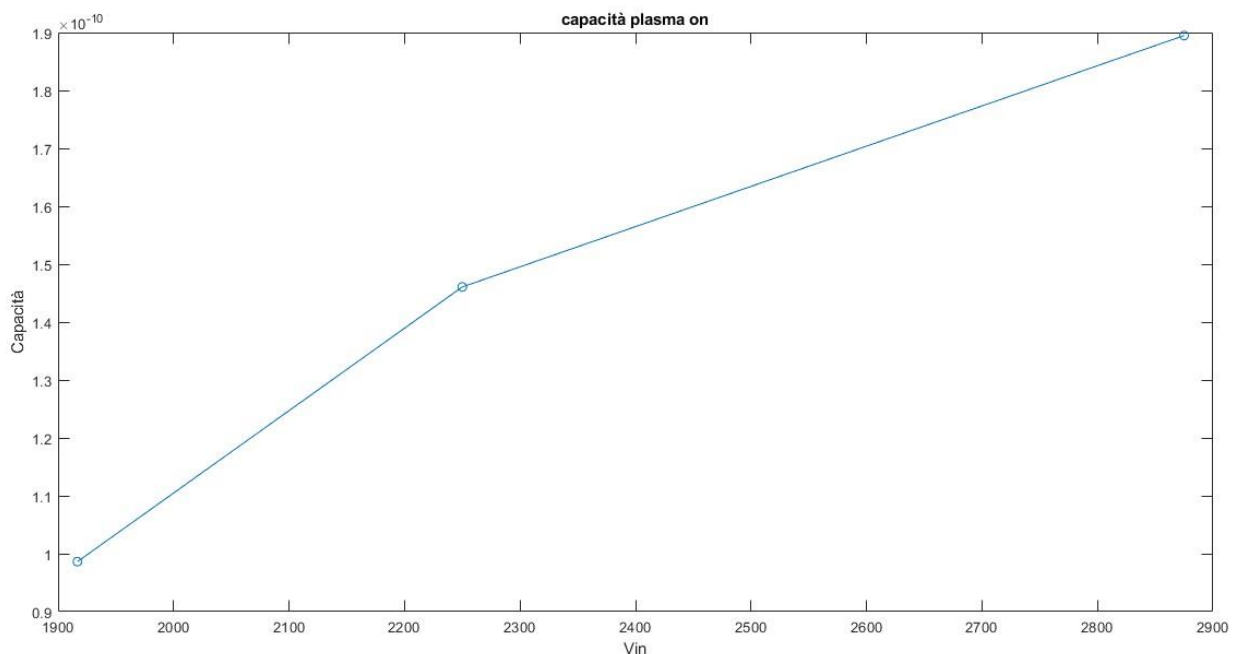


Figura 5.24: capacità plasma a scarica accesa a 1 kHz

La capacità a scarica accesa ha un andamento simile a quello a 100 Hz ed è stato calcolato allo stesso modo, ma il valore massimo è rilevato a 2.8kV, mentre a 100 Hz era a 3.4kV; quindi, sarebbero necessari più prove e a tensione superiore per capire se la C continua ad aumentare, oppure se tende a saturare come a 100 Hz.

5.3.2. Misure di carica depositata a scarica accesa

Per le misure a 1kHz, non è stato usato il voltmetro elettrostatico, ma solo la sonda LV, come specificato nel paragrafo 4.3.2.

Quindi le misure di carica depositata sono state svolte utilizzando la configurazione con il condensatore di misura, il partitore e la sonda di corrente.

3. Partitore capacitivo

$$V_{stimata_{partitore}} = \frac{V_{out}}{K_p} - V_{HV} * K_r$$

$$\sigma_{partitore} = V_{stimata_{partitore}} * \frac{Ck}{S}$$

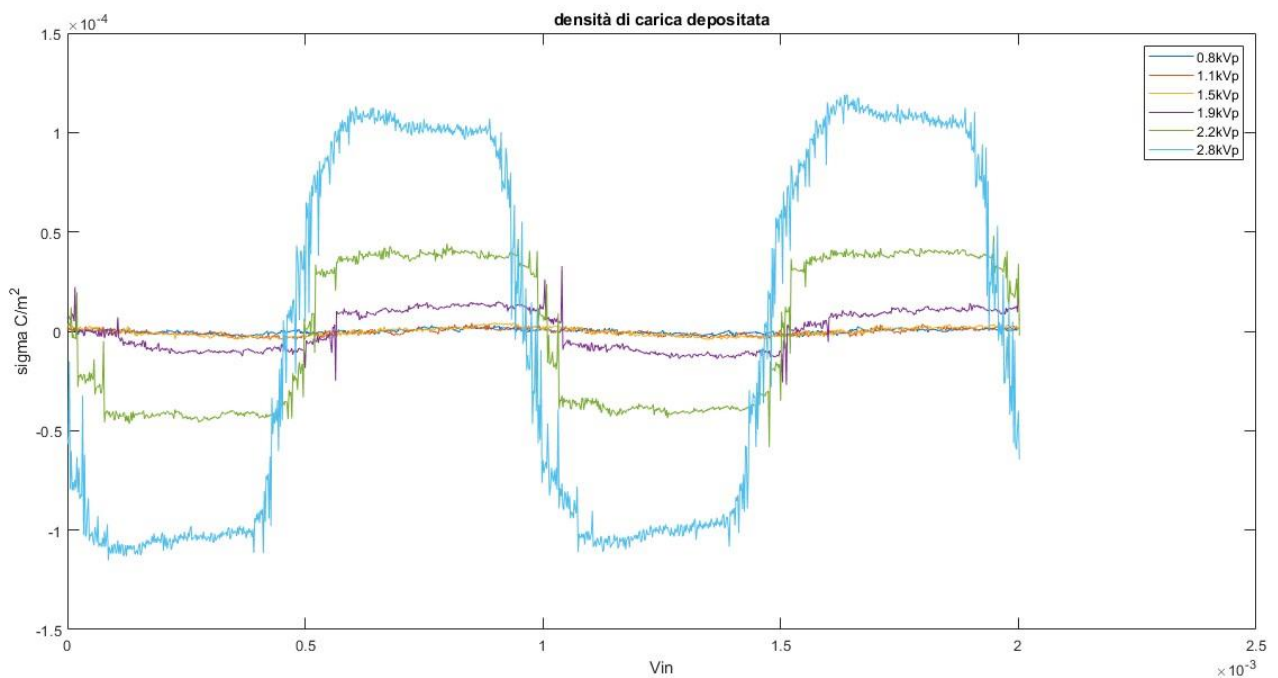


Figura 5.25: densità di carica depositata con la misura sul partitore capacitivo a 1kHz

$$Q_{stimata_{partitore}} = V_{stimata_{partitore}} * Ck$$

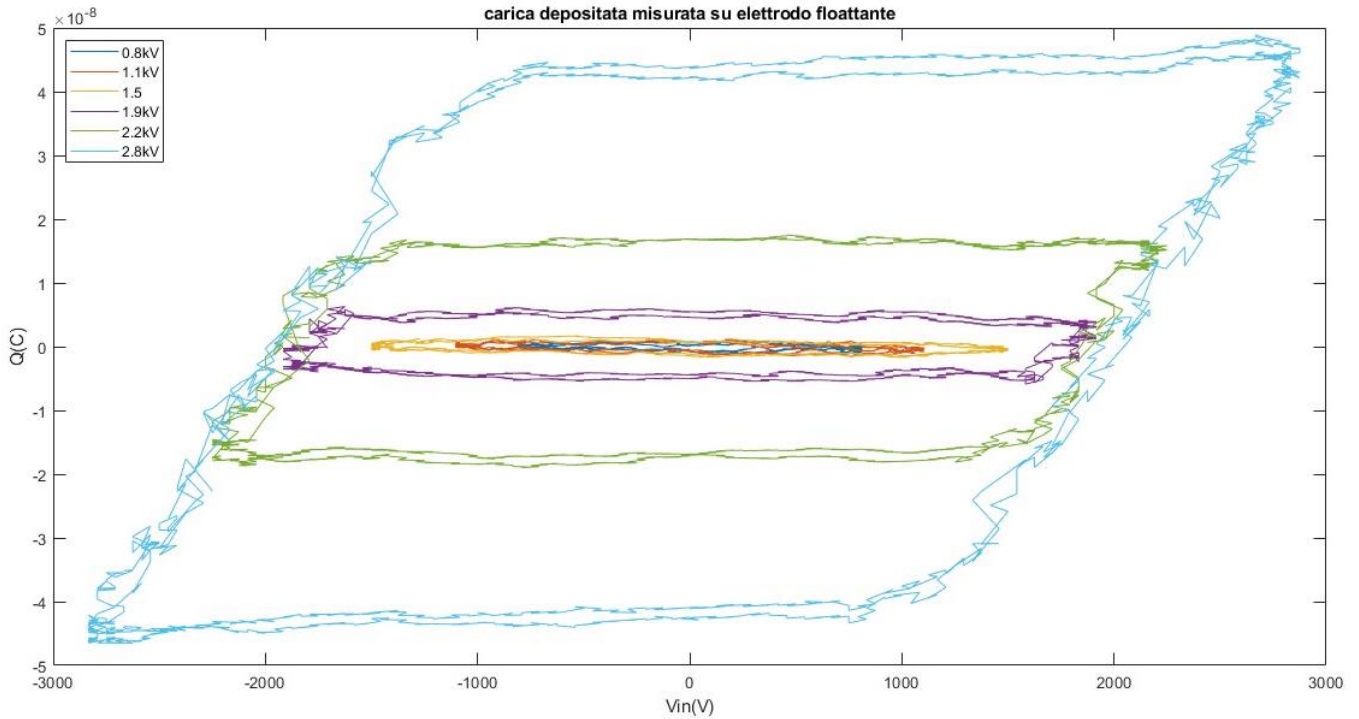


Figura 5.26: diagramma di Lissajous a 1 kHz misurata dal partitore capacitivo

Il diagramma di Lissajous è molto simile a quello a 100 Hz, nonostante sia stata sostituita la sonda elettrostatica con la misura tramite partitore. Considerando $V_{in}=2.8kV$, $Q=4.5e-8 C$.

2. Condensatore di misura

$$Q_{dep-C_{mis}} = V_{carica-dep_{C_{mis}}} * C_{mis}$$

$$V_{carica-dep_{C_{mis}}} = V_{cond-mis} - H * V_{HV}$$

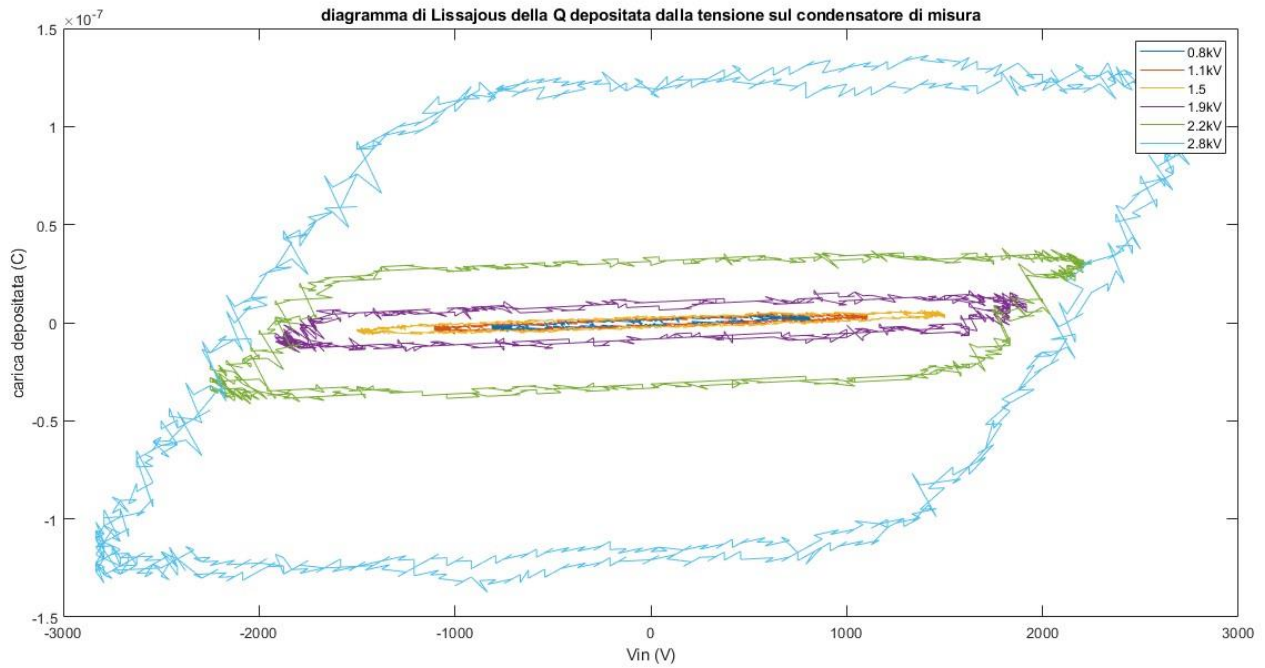


Figura 5.27:diagramma di Lissajous della carica depositata dalla misura sul condensatore di misura

Il diagramma di Lissajous della carica depositata in questo caso risulta estremamente simile a quello a 100 Hz, infatti prendendo ad esempio $V_{in}=2.8kV$, Q è circa $1.2e-7 C$ in entrambi i casi. L'andamento del grafico a 1 kHz risulta più ondulato rispetto a quello a 100 Hz, come se la carica oscillasse nei tratti costanti, probabilmente perché la scarica è più frequente.

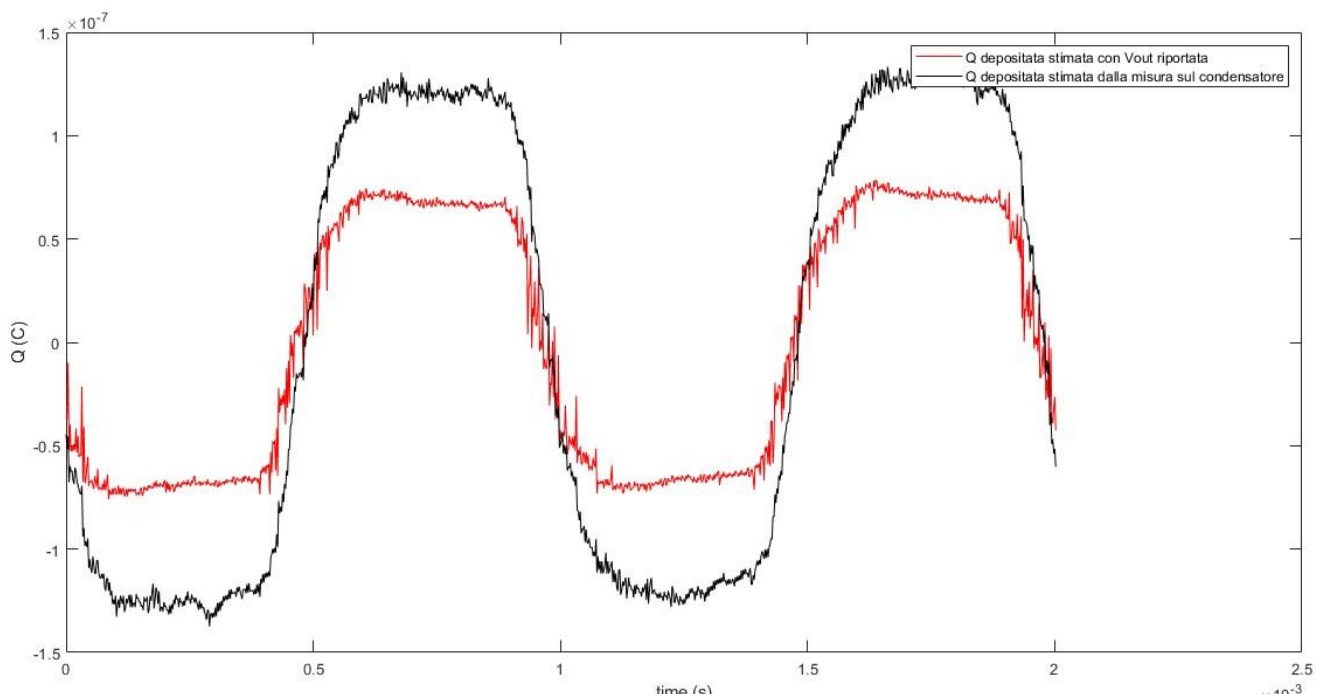


Figura 5.28: Q in funzione del tempo stimata dalla tensione sul partitore e dal condensatore di misura

Il grafico mostra la carica depositata in funzione del tempo per una $V_{in}=2.8\text{kV}$ dalla misura su C_{mis} e da quella sul partitore. Come già sottolineato precedentemente, la carica rilevata tramite il Lissajous ha un valore circa doppio, rispetto a quello rilevato sull'elettrodo flottante, anche se qui la tensione è stata stimata a partire dalla V_{out} sul partitore in uscita, mentre nella misura a 100 Hz era stata rilevata direttamente con il voltmetro elettrostatico.

È necessario sottolineare però che a 100 Hz, $V_{in}=3.4\text{ kV}$, mentre qui è 2.8 kV.

Si nota inoltre che Q assume un andamento piatto probabilmente a causa della frequenza, che è 10 volte superiore a quella precedente, quindi la carica non viene drenata significativamente.

4. Integrale della Corrente e $Q_{stimata_{partitore}} = V_{stimata_{partitore}} * Ck$

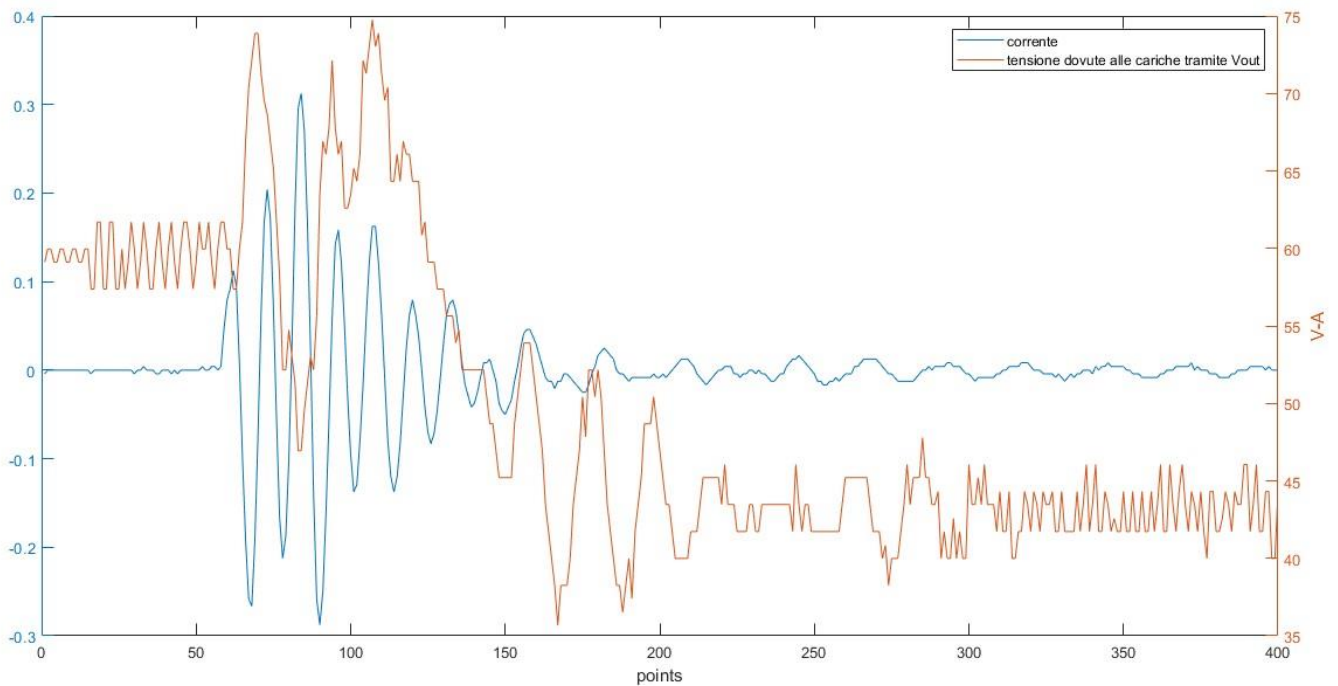


Figura 5.29: streamer di corrente e conseguente diminuzione di V_{out} riportata a 1 kHz

$$HR = 5e - 9;$$

$$Q_i = \text{trapz}(\text{current}(:,5)) * HR$$

$$Q_i = -3.4688e - 09 \text{ C}$$

$$Q_v = (42 - 59) * Ck = -3.4680e - 09 \text{ C}$$

La carica calcolata da uno streamer di corrente sembra essere in questo caso praticamente identica.

Nel caso a 100 Hz, così come in quello a 25 kHz analizzato nel paragrafo successivo, sembra che la sonda di corrente sottostimi la carica.

5.4. Risultati a 25 kHz

5.4.1. Caratterizzazione della scarica

Il diagramma di Lissajous a 25 kHz assume un andamento simile a quelli già analizzati alle frequenze di 100kHz e 1 kHz. Per una $V_{in}=2.8kV$, infatti la Q oscilla sempre tra $\pm 2 C$ circa.

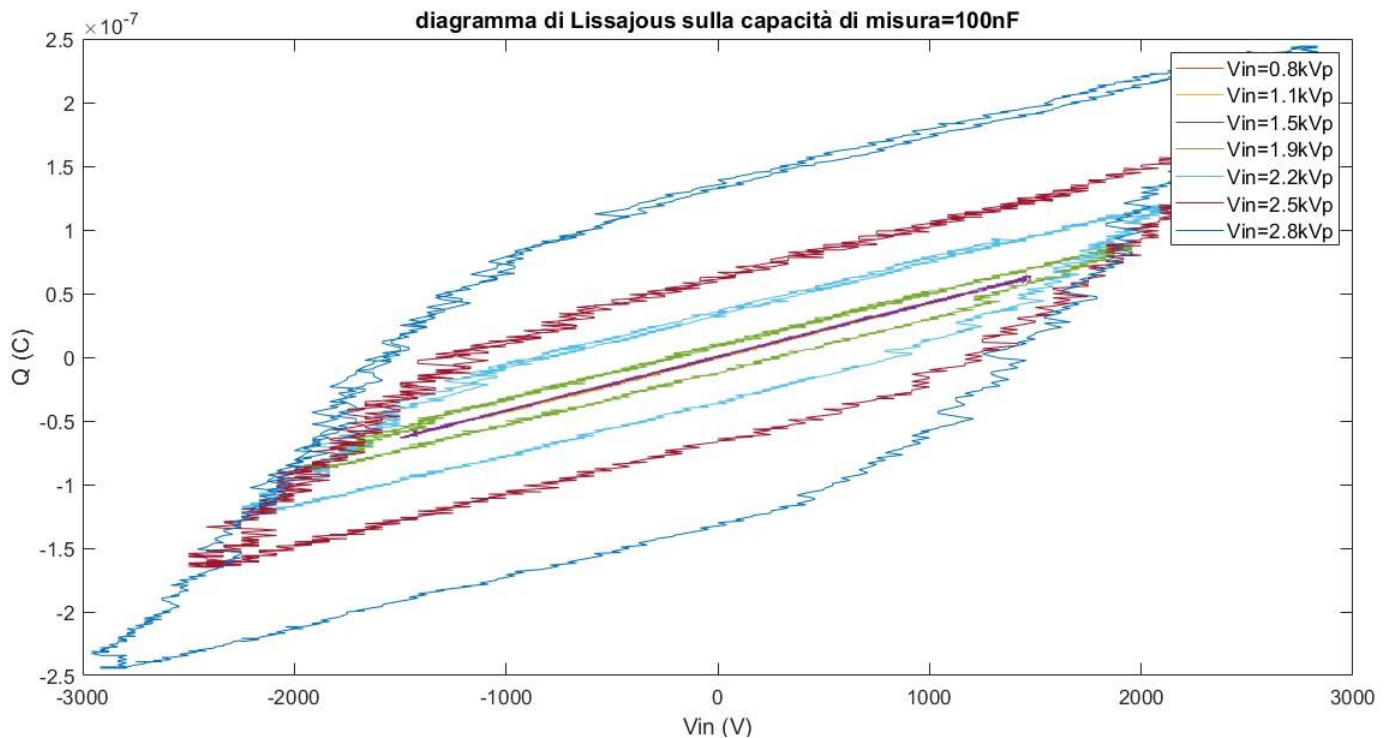


Figura 5.30: diagramma di Lissajous a 25 kHz

Dal grafico della potenza si evince che la scarica si innesca intorno ai 1.7kV, ma i valori raggiunti sono nettamente maggiori di quelli a frequenze inferiori. Il comportamento della potenza non è lineare con la frequenza, lo sarebbe se l'energia trasferita fosse la stessa.

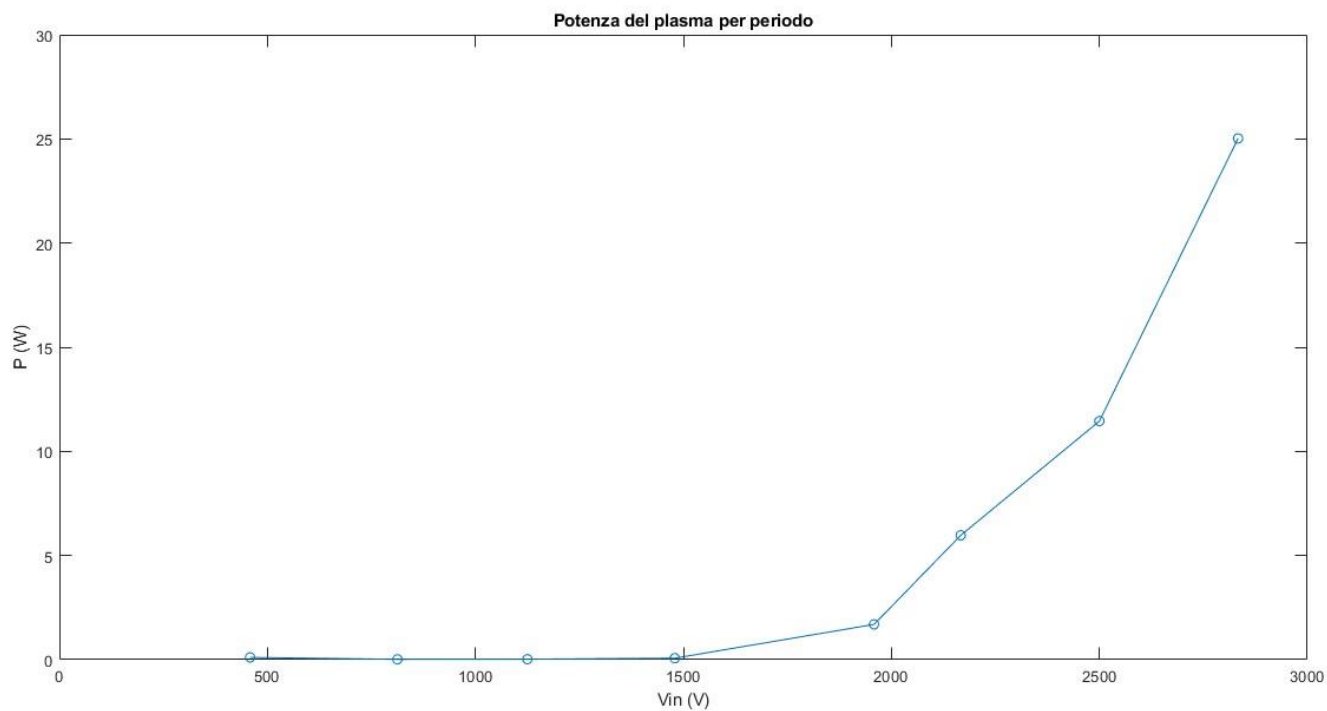


Figura 5.32: potenza iniettata a 25 kHz

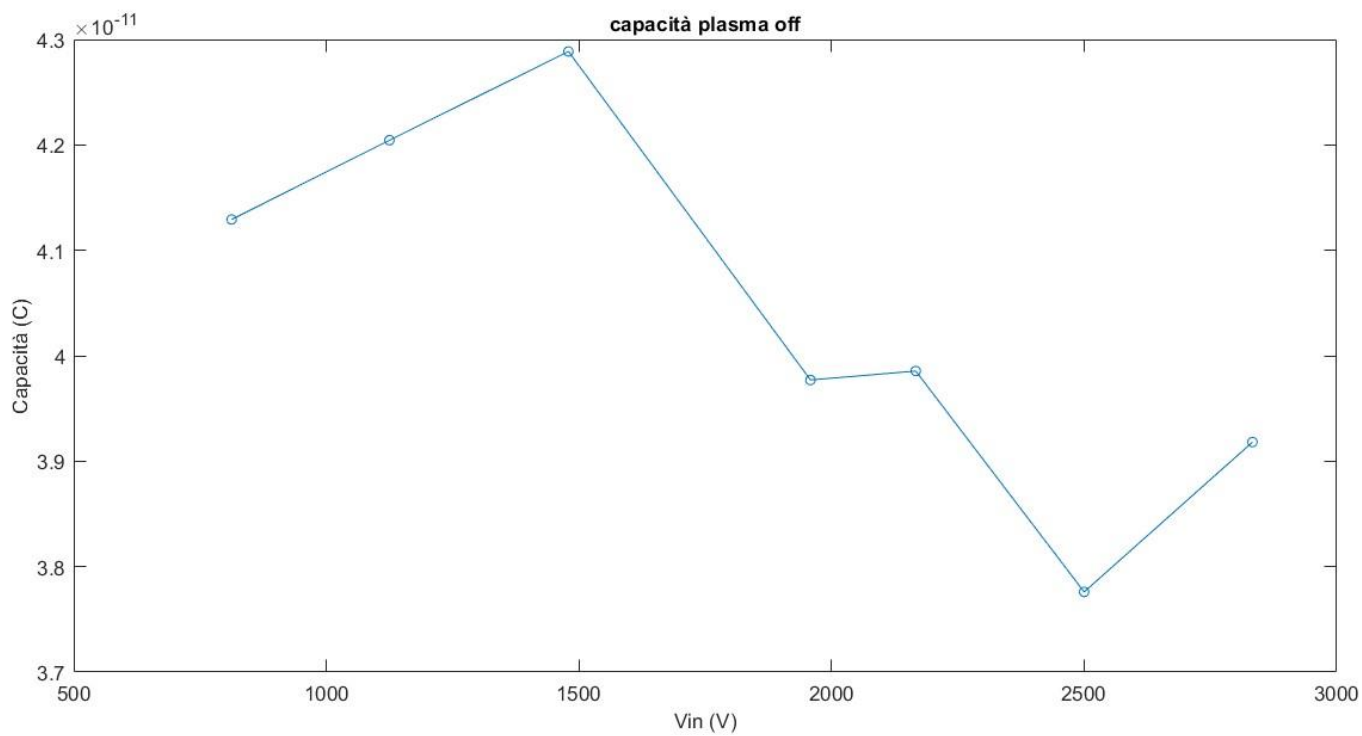


Figura 5.31: capacità plasma a scarica spenta 25 kHz

Come già sottolineato nel capitolo precedente, la capacità a plasma spento si mantiene attorno a 40 pF nel range di tensioni applicato. La supposizione in questo sembra confermata dal fatto che la capacità cala ulteriormente rispetto al caso con $f=1$ kHz probabilmente a causa di un aumento della temperatura e quindi della conducibilità.

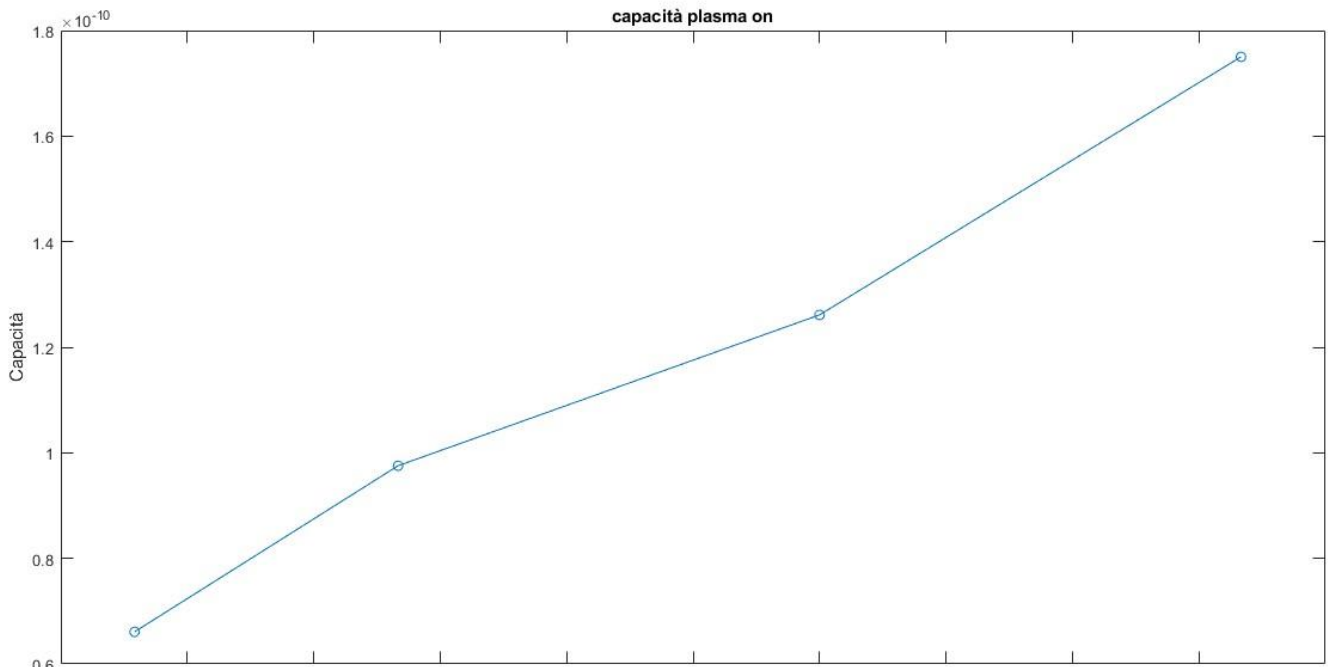


Figura 5.33: capacità plasma a scarica accesa 25 kHz.

A scarica accesa la capacità passa da 70 pF a 180 pF (aumenta di un fattore 2.5) in un range da 1.9kV a 2.8kV. In un range analogo a 100 Hz e 1 kHz, la variazione sembra più blanda (fattore 2.1), ma ci sono troppi pochi punti per fare una valutazione accurata. Inoltre il calcolo delle capacità è stato eseguito dal diagramma di Lissajous come rapporto $\Delta Q/\Delta V$ ed è evidente che l'approssimazione introdotta è notevole. A ciò si aggiunge il fatto che a questa frequenza la scarica è innescata anche sotto al mylar, quindi la carica sarà depositata anche lì.

5.4.2. Misure di carica depositata a 25kHz

3. partitore capacitivo

La densità di carica è calcolata analogamente al caso con $f=1\text{kHz}$

$$V_{stimata_{partitore}} = \frac{V_{out}}{K_p} - V_{HV} * K_r$$

$$Q_{stimata_{partitore}} = V_{stimata_{partitore}} * Ck$$

$$\sigma_{partitore} = V_{stimata_{partitore}} * \frac{Ck}{S}$$

L'andamento della densità di carica segue quello già analizzato alle frequenze inferiori, si può però notare che $\sigma = 1.5e - 4 \frac{C}{m^2}$ per una $V_{in}=2.8\text{kV}$. Per la stessa tensione a 1kHz $\sigma = 1e - 4 \frac{C}{m^2}$ circa.

La densità di carica è stata stimata macroscopicamente come se la scarica avvenisse in modo uniforme, ma le immagini con la fotocamera intensificata hanno mostrato che la scarica si forma per metà periodo in un lato della regione di scarica, per l'altra metà del periodo nell'altra metà. Quindi si può considerare la densità

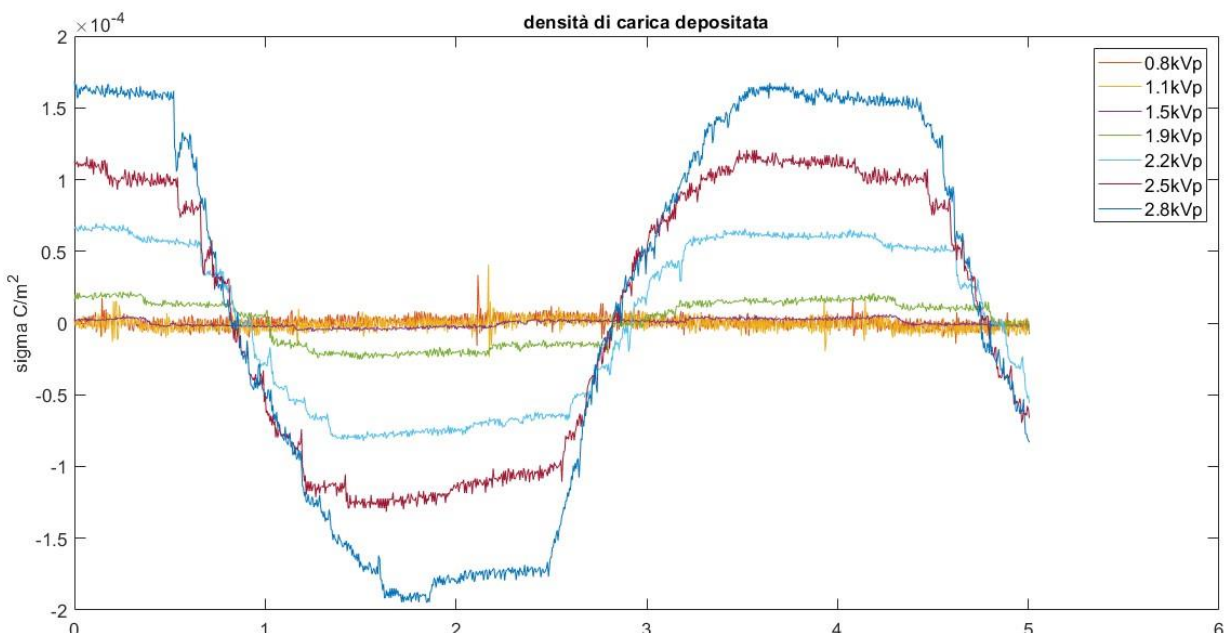


Figura 5.34: densità di carica dalla misura della V_{out} sul partitore

mediamente sulla superficie assunta come regione di scarica, sapendo però che la scarica si forma anche sotto il mylar.

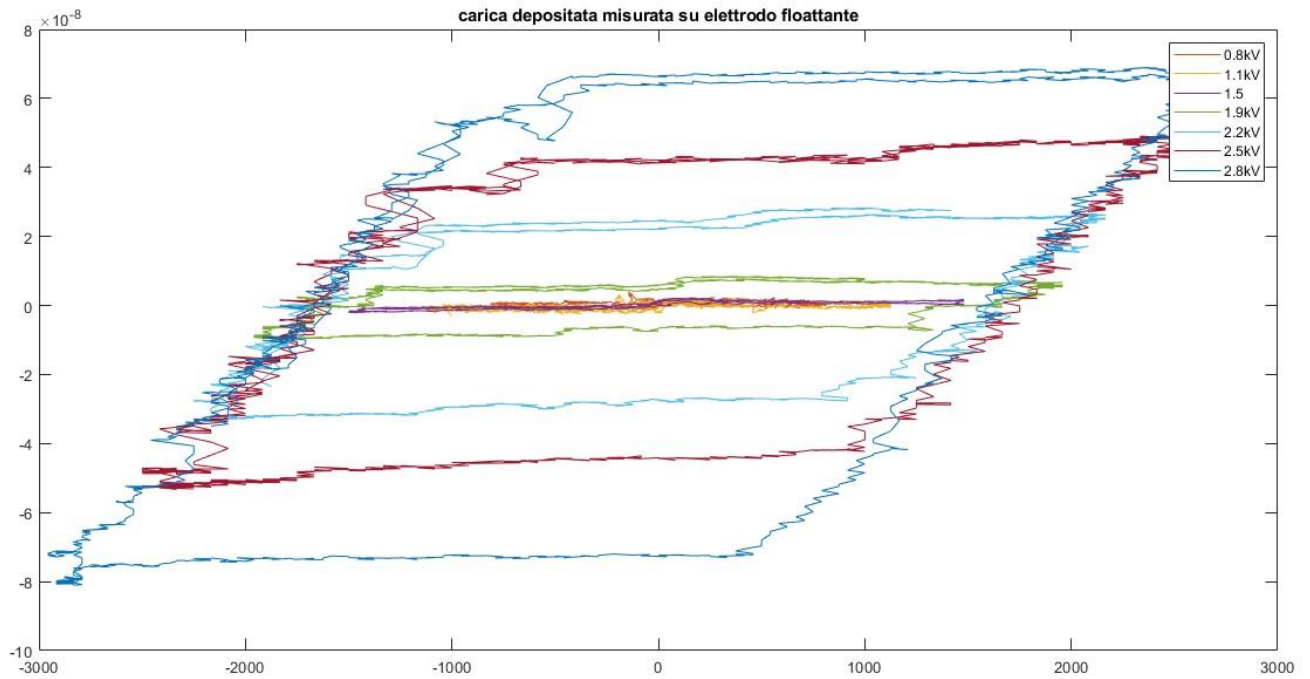


Figura 5.35: diagramma di Lissajous della Q depositata rilevata tramite la misura V_{out} sul partitore capacitivo

Anche in questo caso per $V_{in}=2.8$ kV, $Q=6e-8$ C, che è piuttosto simile a quanto si è sottolineato a 100 Hz e 1 kHz.

2. Condensatore di misura

$$Q_{dep-C_{mis}} = V_{carica-dep_{C_{mis}}} * C_{mis}$$

$$V_{carica-dep_{C_{mis}}} = V_{cond-mis} - H * V_{HV}$$

Il diagramma di Lissajous dalla misura della tensione sul condensatore di misura mostra che per una $V_{in}=2.8$ kV, la Q depositata è circa pari a:

$$Q_{dep-C_{mis}} = 1.5e - 7 C$$

Che corrisponde ai valori ottenuti per le frequenze inferiori analizzate.

Ricorre nuovamente in figura 5.35 che la carica depositata tramite V_{out} (misura sul partitore) sottostima di un fattore 2 la carica poiché considera una superficie pari alla metà di quella in cui realmente si genera la scarica.

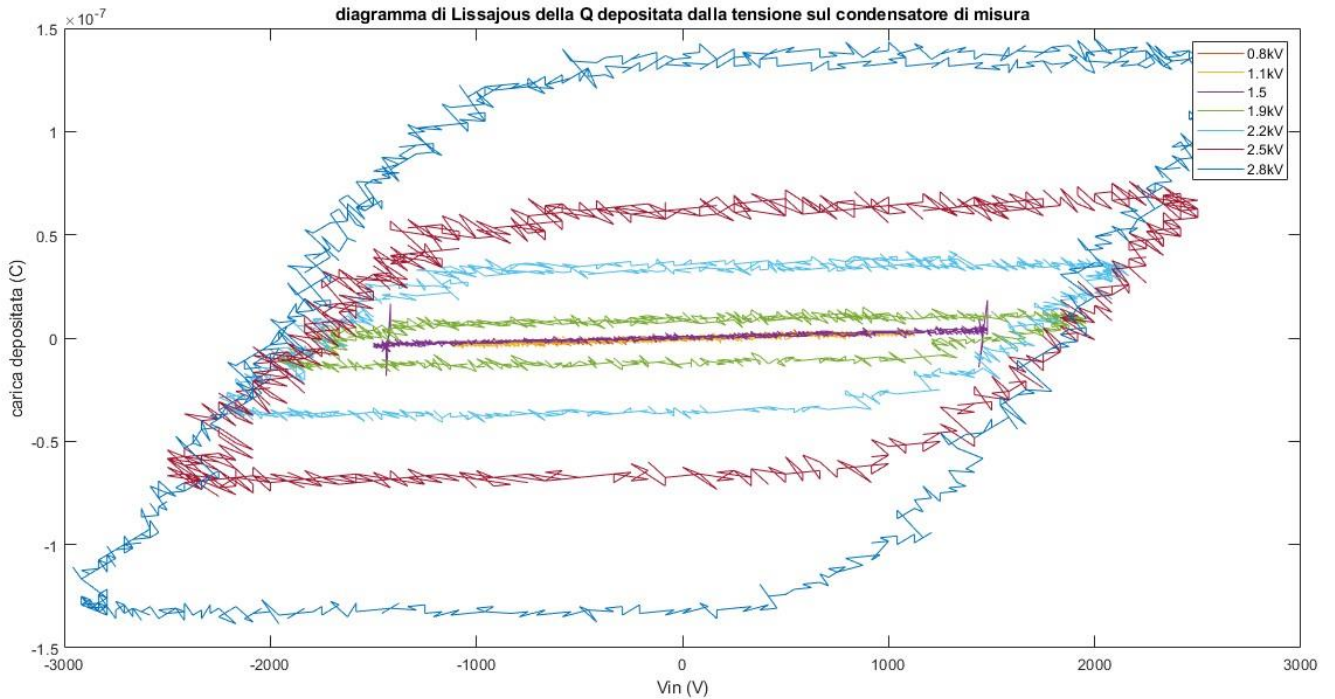


Figura 5.36:diagramma di Lissajous della carica depositata valutata dalla misura sul condensatore di misura a 25 kHz

Ciò accade per la $V_{in}=2.8kV$, ma per tensioni inferiori (si veda 2.5kV) i due diagrammi sembrano coincidere, forse perché questo fenomeno si innesca sopra una certa tensione.

Il Lissajous sul partitore di tensione V_{out} è asimmetrico rispetto a $Q=0$, cioè sembra che la carica negativa depositata sia superiore a quella positiva.

4. Integrale della corrente

$$HR = 5e - 9;$$

$$Q_i = \text{trapz}((k(1:200,5,1))) * HR = -1.7748e - 08 C$$

$$Q_v = (-83 - 4) * Ck = -2.1521e - 08 C$$

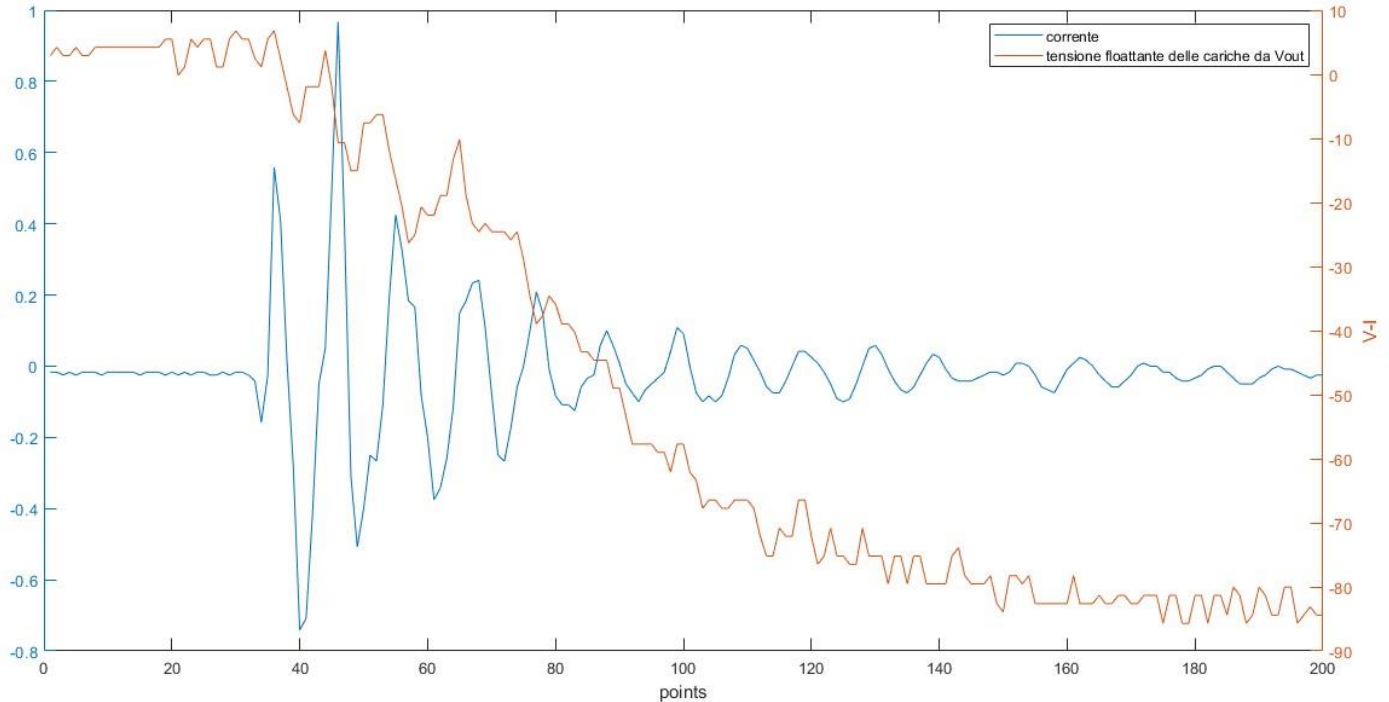


Figura 5.37: streamer di corrente e conseguente diminuzione della Vout rilevata dal partitore a 25 kHz

La figura 5.37 mostra uno streamer di corrente e la conseguente variazione di tensione sull'elettrodo flottante a partite da Vout riportata secondo il rapporto Kp. L'ordine di grandezza delle due misure coincide ma Qv è in modulo maggiore di Qi e ciò è in contrasto con le misure di carica ottenute con i Lissajous ai punti 2) e 3) di questo paragrafo. Infatti, la corrente è misurata a valle dell'elettrodo di terra, quindi dovrebbe risentire di tutte le cariche depositate, mentre l'acquisizione tramite l'elettrodo flottante è limitata alla superficie dell'elettrodo. Questo potrebbe essere dovuto alla sonda di corrente che non rileva adeguatamente gli streamer, pertanto si potrebbe approfondire il fenomeno con una sonda di banda maggiore.

5.5. Risultati misure con OPAMP

Con la board, il rumore delle scariche HF del plasma si concatena a Vopamp e rende la misura irrealizzabile ma, il segnale osservato dall'oscilloscopio risulta stabile, quindi la corrente di bias non perturba la misura.

Con il TL081 sono state svolte molteplici prove. Non è chiaro se i diodi Schottky riescano a intervenire in tempo per proteggere l'ingresso.

Inoltre i picchi di scarica vengono amplificati in configurazione voltage follower.

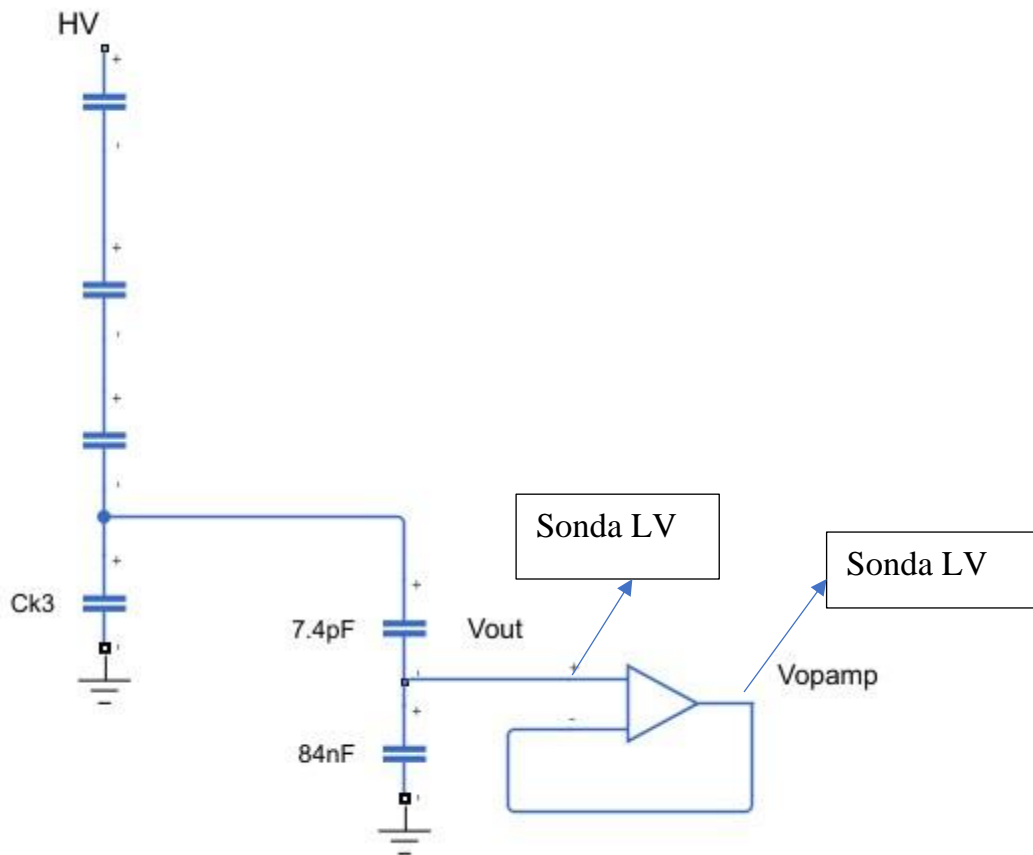


Figura 5.38: setup sperimentale con OPAMP in voltage follower, sonde di bassa tensione posizionate

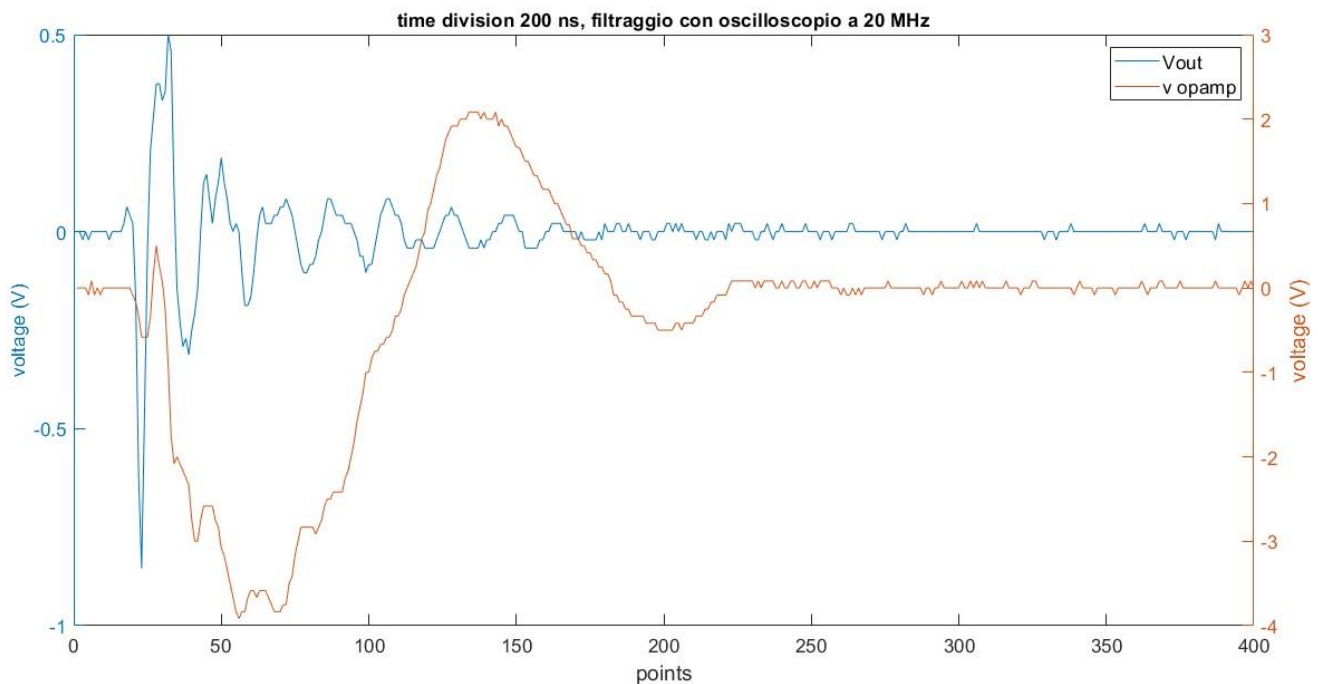


Figura 5.39: confronto tensione V_{out} e V_{opamp} per valutare la risposta dinamica

Il modello in figura 5.38 mostra dove sono state posizionate le sonde per rilevare il segnale V_{out} in uscita al partitore e V_{opamp} come uscita all'amplificatore.

L'oscilloscopio è stato mantenuto a una $f_t=20$ MHz.

Dal grafico 5.39 si evince che la tensione prima dell'opamp, è più veloce nella risposta, ma ci si aspetterebbe che il TL081 rispondesse in modo prolungato con picchi inferiori, in modo che l'area sottesa alle due curve sia sempre la stessa. Come si vede in figura la sua tensione è amplificata di 5 volte, senza un'apparente motivazione.

È stato inserito anche un filtro passabasso sulla V_{out} ma l'attenuazione dei picchi non viene eseguita.

Il TL081 sembra rispondere parzialmente alle variazioni veloci di carica depositata ma poi il segnale deriva assestandosi attorno a 1V circa, probabilmente a causa della corrente di bias.

La lentezza della risposta è dovuta probabilmente anche a una differenza nella dinamica dei condensatori che, essendo avendo taglie molto diverse, hanno τ diversi.

Questo potrebbe anche compromettere il rapporto di partizione, che come visto sembrava non essere totalmente rispettato.

Sicuramente da queste prove si è compreso che l'opamp per scariche di tipo volumetrico è inutile, infatti ove vi sia una continua deposizione di carica basta la sonda LV che ha una banda di 400 MHz e permette di seguire bene il segnale, diversamente dall'opamp.

Risulta però essenziale nell'ottica di misure spazio-risolve (con un reattore EHD, ad esempio) per le proprietà già largamente descritte, ma necessita di ulteriore studio ed approfondimento.

5.6. Confronto 100 Hz-1kHz-25kHz

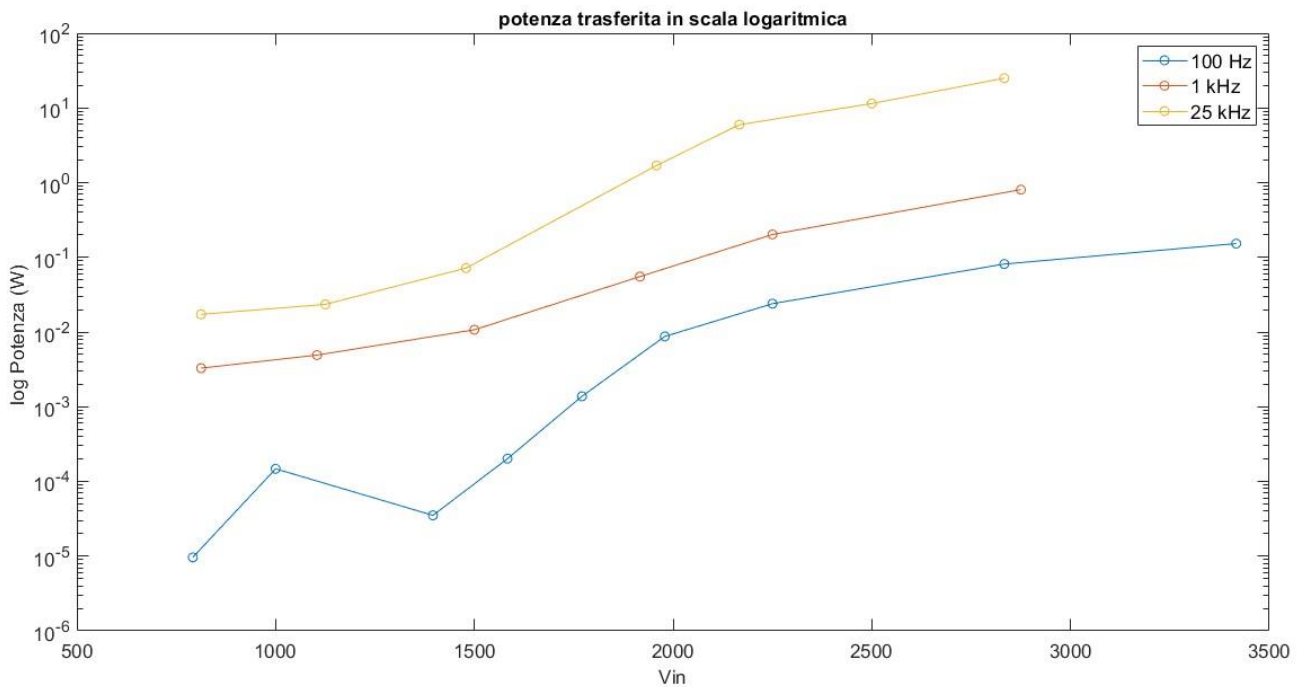


Figura 5.40: confronto potenza trasferita a 100Hz, 1 kHz, 25 kHz in scala semilogaritmica

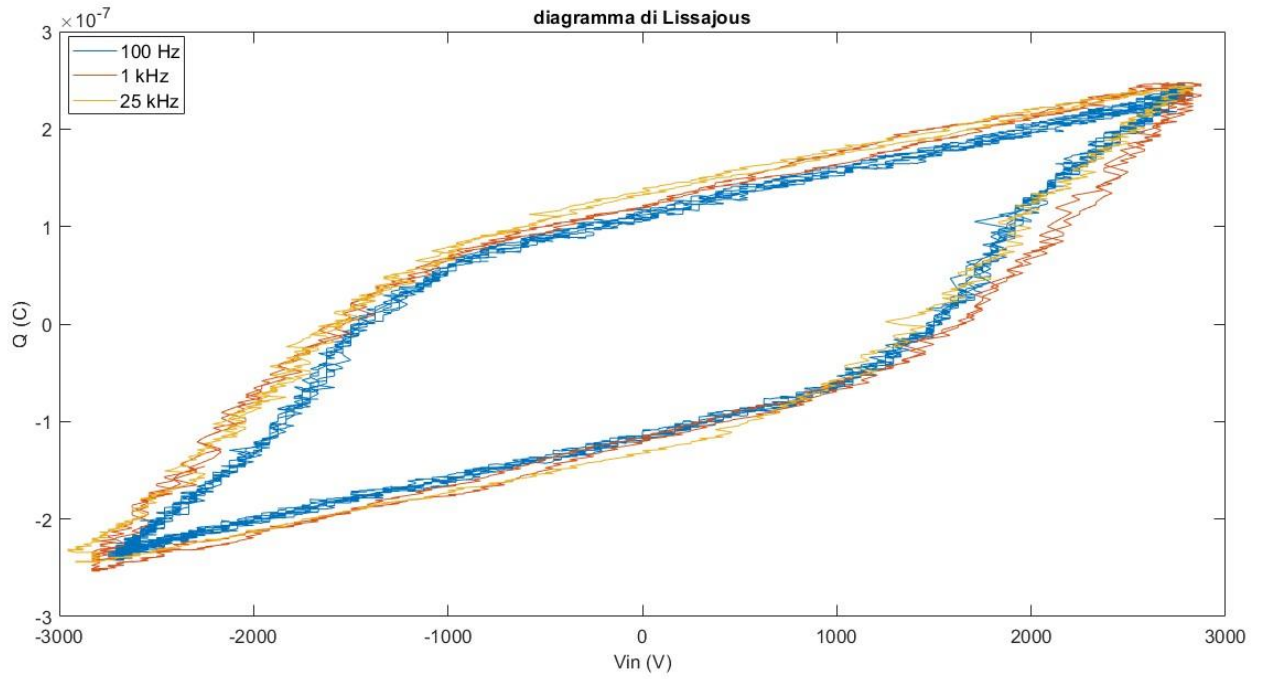


Figura 5.41: diagramma di Lissajous per $V_{in}=2.8kV$ a 100 Hz, 1 kHz, 25 kHz

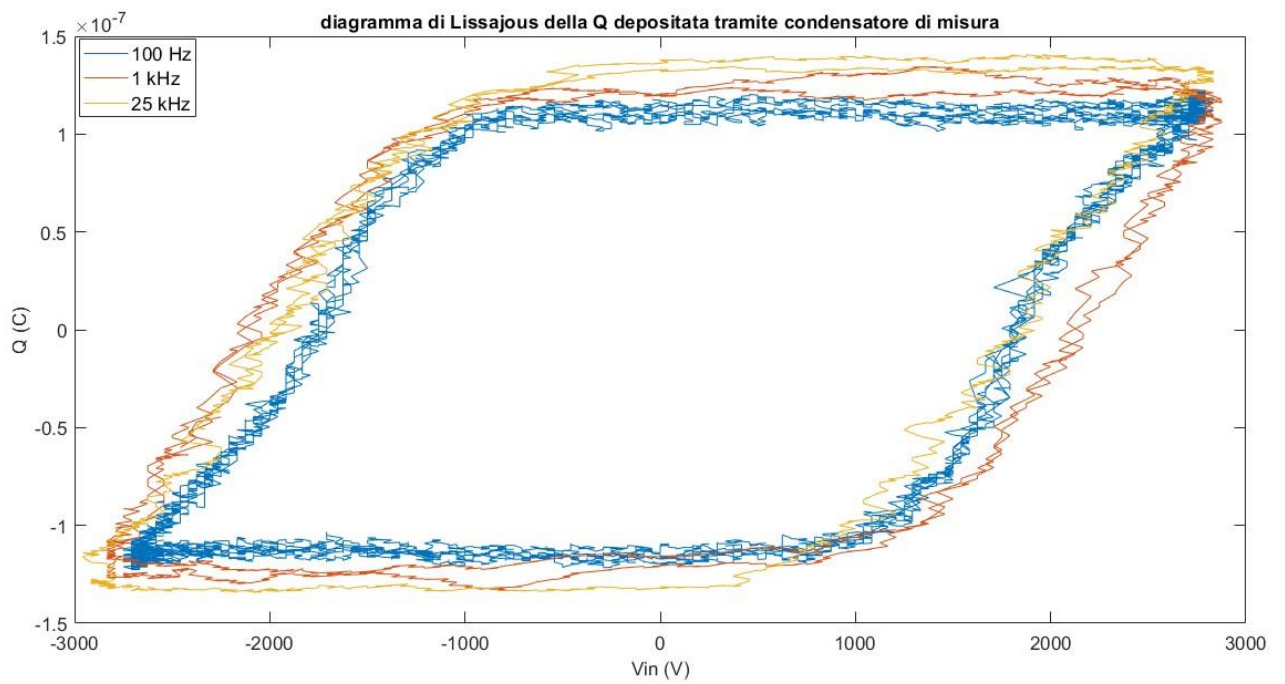


Figura 5.42: diagramma di Lissajous della carica depositata con $V_{in}=2.8kV$, per $f=100Hz$, 1kHz 25kHz, dalla misura su C_{mis}

Il diagramma di Lissajous della carica depositata mostra che per il caso del condensatore di misura, a $V_{in}=2.8\text{kHz}$, sono perfettamente sovrapposti. Ciò implica che la carica è la stessa a tutte e tre le frequenze. Questo è dovuto principalmente al fatto che il gap è il medesimo e molto stretto, quindi la scarica si mantiene piuttosto omogenea. Inoltre nonostante la frequenza venga aumentata di 250 volte, i fronti di salita e discesa della V_{in} rimangono distanti a tal punto da permettere la ricombinazione delle cariche e dei metastabili. Se fossero molto vicini, cioè per frequenze dell'ordine dei MHz, rimarrebbe depositata un'ulteriore carica.

5.7. Confronto con simulazioni numeriche di una DBD volumetrica

In questo paragrafo si confrontano i dati sperimentali con quelli ottenuti da simulazioni numeriche eseguite precedentemente [15].

È stata simulata una DBD volumetrica come quella mostrata in figura 5.43, che è molto simile al reattore costruito per questa tesi. Il dielettrico utilizzato è nastro di kapton e il gap è aria.

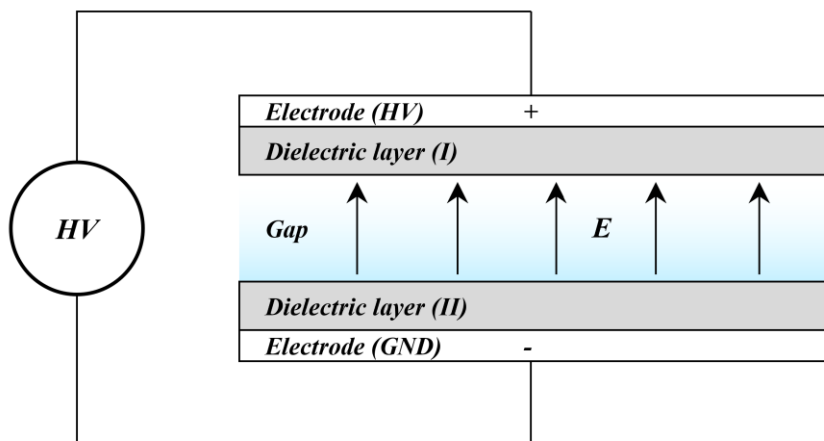


Figura 5.43: modello reattore DBD simulato

Gap - thickness	4e-4	m
Dielectric layer - thickness	2e-4	m
Dielectric layer - surface	1.6e-3	m ²
Dielectric layer permittivity	3.4	
External voltage – amplitude	4.8	kV
External voltage - frequency	15	kHz

I valori dei parametri sono mostrati nella tabella. Si nota che la tensione e il gap di aria utilizzati sono maggiori di quelli considerati in questo setup sperimentale. La frequenza è invece 15 kHz (vs 25 kHz). La superficie è un po' più ampia.

Quindi si potrebbe assumere che l'effetto della maggiore tensione sia compensato dal gap più ampio e da una minore frequenza. In definitiva il setup simulato non è esattamente lo stesso che è stato qui realizzato, ma è estremamente interessante notare che i risultati del modello hanno lo stesso ordine di grandezza di quelli misurati.

Nello specifico il grafico della densità di carica mostra un appiattimento sulla sommità, come quelli ottenuti dalle misure, dell'ordine di 10^{-4} C/m². L'elettrodo flottante rileva correttamente anche il segno della carica, che nel grafico fa riferimento al layer II, infatti in un semiperiodo della V_{in} positivo, la carica misurata e simulata è positiva e viceversa in quello negativo.

Si potrebbero fare ulteriori supposizioni più accurate sul valore esatto della densità di carica sulla base dei parametri di progetto, ma sono necessarie più misure e nuove simulazioni che implementano esattamente il reattore qui costruito.

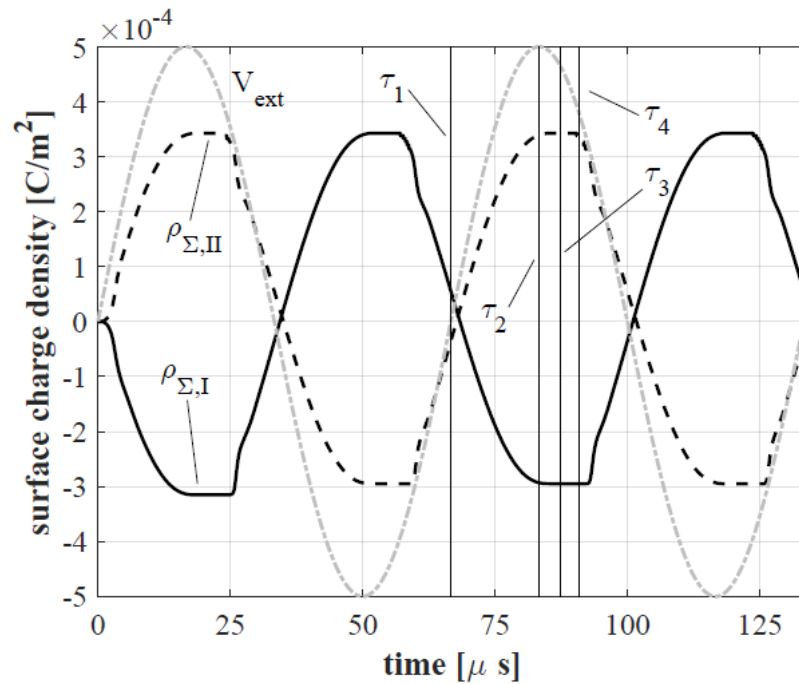


Figura 5.44: densità di carica depositata sul dielettrico I e II nella simulazione

6. Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato è lo sviluppo di un sistema di misura tempo-risolta per la carica superficiale prodotta da una scarica a barriera dielettrica. In particolare, si è studiato e realizzato un reattore volumetrico e la carica è stata rilevata attraverso un elettrodo flottante. L'intera attività si è incentrata sull'analisi delle prestazioni di un voltmetro elettrostatico, di una sonda di bassa tensione e di alcuni amplificatori operazionali.

Le misure sono state effettuate alimentando il reattore con una tensione sinusoidale variabile e con frequenza pari a 100 Hz, 1 kHz, 25 kHz.

Per acquisire tale carica, soprattutto se la scarica è spenta, è necessario che la superficie sulla quale si deposita non venga toccata, altrimenti le cariche saranno drenate a terra tramite l'impedenza non nulla dello strumento.

Il voltmetro elettrostatico ha una banda troppo ridotta, quindi non segue con accuratezza le variazioni veloci, ma rileva bene l'andamento medio della tensione poiché è una misura contactless. È stato utilizzato solo per la più bassa delle frequenze di alimentazione pari a 100 Hz.

Alimentando a 1 e 25 kHz il voltmetro elettrostatico non ha le prestazioni di banda richieste.

Quindi si è optato per una sonda di bassa tensione posizionata a valle di un partitore capacitivo il cui ingresso è collegato all'elettrodo flottante. Questa rileva bene la dinamica della scarica, e il suo valor medio, ma drena le cariche anche se si isola galvanicamente con il partitore. Di fatto quest'ultimo set up può essere usato per le misure a scarica accesa, come quelle effettuate in questa tesi, nelle quali vi è continua iniezione di carica. Non funziona però quando si prova a misurare una tensione sulla superficie, dopo che la scarica si è spenta.

Sono stati utilizzati due OPAMP, ma con scarso successo a causa del rumore elettromagnetico, dell'incertezza sulla dinamica dei condensatori che compromettono il rapporto di partizione e per i picchi di tensione che portavano a continue rotture di tali componenti. Gli OPAMP si confermano come la soluzione ottimale per il loro

prezzo, l'isolamento galvanico che garantiscono e l'elevata banda passante, ma necessitano di maggiori approfondimenti.

Le misure di carica sono state svolte tramite la tensione su un condensatore di misura in serie al reattore (V_{cond_mis}), tramite la tensione in uscita al partitore (V_{out}) collegato all'elettrodo flottante, con l'integrale della corrente che attraversa l'intero reattore e con la tensione rilevata dalla sonda elettrostatica (solo a 100 Hz) V_{sonda} sull'elettrodo flottante.

La carica con il condensatore di misura alle 3 frequenze risulta essere all'incirca la stessa ($4\div 6 \cdot 10^{-8}$ C). Questo accade probabilmente perché gli elettroni e i metastabili riescono a ricombinare nell'intervallo di tempo tra una scarica e l'altra. Si potrebbero effettuare delle prove a frequenze ancora più elevate per verificare questa ipotesi.

Le misure ottenute tramite la sonda elettrostatica e V_{out} sul partitore capacitivo mostrano una carica pari a circa la metà di quella ottenuta con il condensatore di misura. Questo accade perché il plasma si genera anche al di sotto dei distanziatori di mylar. Essi hanno complessivamente una superficie paragonabile a quella dell'elettrodo flottante, posizionato al di sotto della regione di scarica, quindi quest'ultima misura una tensione pari alla metà di quella rilevata dal condensatore di misura. Questo dettaglio è stato notato tramite le foto con la ICCD camera.

Le stime della carica ricavate con l'integrale della corrente di uno streamer presentano un corretto ordine di grandezza, ma non vi è sempre corrispondenza con l'aumento di tensione, dovuto a quello stesso impulso. Questo potrebbe indicare che è necessario acquisire la corrente con una sonda più prestante in termini di banda.

Infine i risultati ottenuti sono stati confrontati con le simulazioni numeriche [15] di un reattore DBD con una configurazione analoga a quella di questo lavoro, ma con specifiche di progetto leggermente diverse. La densità di carica depositata ottenuta in simulazione ha lo stesso ordine di grandezza delle misure (10^{-4} C/m²) e presenta la medesima evoluzione temporale.

Bibliografia

- [1] – Tesi di Laurea di Zanotti E., “Metodo per la stima della distribuzione di carica superficiale su dielettrici piani “, 2022.
- [2] – Tesi di Bernardini E., “Misure di carica superficiale depositata da un sistema elettrico punta-piano”, 2020.
- [3] – D. Hong a, H. Rabat, Y.-K. Pu, A. Leroy – Brown Richard E., “Measurement of the surface charging of a plasma actuator using surface DBD”, 2012.
- [5] – Neretti G., Ricchiuto A.C., Borghi C.A., “Measurement of the charge distribution deposited by an annular plasma synthetic jet actuator over a target surface”, Università di Bologna, 2018.
- [6] – Gon-Ho Kim, Soo-Yeon Jeong, Ho-Cheol Kwon, “Capacitance Between an Atmospheric Discharge Plasma and the Dielectric Electrode in the Parallel Cell Reactor”, 2005.
- [7] – Wild R., Stollenwerk L., “Phase-resolved measurement of the spatial surface charge distribution in a laterally patterned barrier discharge”, 2014.
- [8] – Toshiyuki Kawasaki, Tokihiro Terashima, Yongchang Zhu, Tatsuo Takada, Takashi Maeno, “Highly sensitive measurement of surface charge distribution using the Pockels effect and an image lock-in amplifier”, 1994.
- [9] – Kogelschatz U., “Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications”, 2002.
- [10] – Leonov S., Petrishchev V., Adamovich I.V., “Dynamics of energy coupling and thermalization in barrier discharges over dielectric and weakly conducting surfaces on μs to ms time scales”, 2014.
- [11] – Leonov S., Houpt A.W., “Charge Transfer in Constricted Form of Surface Barrier Discharge at Atmospheric Pressure”, 2017.
- [12] – Prance R. J., Debray A., Clark T. D., Prance H., Nock M., Harland C. J., Clippingdale A.J., “An ultra-low-noise electrical-potential probe for human-body scanning”, 2000.
- [13] – Neretti G., Ricco M., “Self-Tuning High-Voltage and High-Frequency Sinusoidal Power Supply for Dielectric Barrier Discharge Plasma Generation”, Università di Bologna, 2019.

[14] – Tesi di Dottorato di Seri P., “Sterilization by means of a surface Dielectric Barrier Discharge: effects of Electro-Hydro-Dynamics and reactive species”, 2017.

[15] – Tesi di Dottorato di Popoli A., “Numerical methodologies for non-equilibrium plasma modelling”, 2021.