



## Rapporti Tecnici INAF INAF Technical Reports

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>Number</b>                      | 177  |
| <b>Publication Year</b>            | 2022   |
| <b>Acceptance in OA@INAF</b>       | 2022-08-04T12:35:19Z   |
| <b>Title</b>                       | Caratterizzazione delle sonde elettrostatiche CIRA presso IAPS   |
| <b>Authors</b>                     | PARMENTIER, ALEXANDRA; PAPINI, EMANUELE; BATTISTA, FRANCESCO; INVIGORITO, MARCO; RICCI, DANIELE; SALVATORE, VITO; MORBIDINI, Alfredo; VERTOLLI, Nello; DIEGO, Piero                                    |
| <b>Affiliation of first author</b> | IAPS Roma  |
| <b>Handle</b>                      | <a href="http://hdl.handle.net/20.500.12386/32535">http://hdl.handle.net/20.500.12386/32535</a> ;<br><a href="https://doi.org/10.20371/INAF/TechRep/177">https://doi.org/10.20371/INAF/TechRep/177</a> |

## Caratterizzazione delle sonde elettrostatiche CIRA presso IAPS



Alexandra Parmentier<sup>1</sup>, Emanuele Papini<sup>1</sup>, Francesco Battista<sup>2</sup>, Marco Invigorito<sup>2</sup>, Daniele Ricci<sup>2</sup>, Vito Salvatore<sup>2</sup>, Alfredo Morbidini<sup>1</sup>, Nello Vertolli<sup>1</sup>, Piero Diego<sup>1</sup>

1; INAF-IAPS, Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133, Roma

2; CIRA, Via Maiorise snc - 81043 Capua (CE)

# Sommario

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | Indice delle figure.....   | 3  |
| 2      | Nomenclatura.....  | 4  |
| 3      | Introduzione.....  | 5  |
| 4      | Scopo del documento.....   | 5  |
| 5      | Architettura delle sonde CIRA.....                                   | 6  |
| 5.1.1  | Sonda di Langmuir.....   | 6  |
| 5.1.2  | Sonda di Faraday.....  | 7  |
| 6      | Attività sperimentale presso IAPS.....                               | 10 |
| 6.1    | Laboratorio di fisica del plasma e camera al plasma presso IAPS..... | 10 |
| 6.2    | Setup Sperimentale.....  | 11 |
| 6.2.1  | Catena di misura.....  | 11 |
| 6.2.2  | Software di acquisizione e analisi dati.....                         | 12 |
| 6.2.3  | Supporto sonde e cablaggio.....                                      | 15 |
| 6.3    | Strategia di test.....   | 16 |
| 6.4    | Curve caratteristiche I-V.....                                       | 17 |
| 6.4.1  | Test ID #1.....  | 17 |
| 6.4.2  | Test ID #2.....  | 17 |
| 6.4.3  | Test ID #3.....  | 18 |
| 6.4.4  | Test ID #4.....  | 18 |
| 6.4.5  | Test ID #5.....  | 19 |
| 6.4.6  | Test ID #6.....  | 19 |
| 6.4.7  | Test ID #7.....  | 20 |
| 6.4.8  | Test ID #8.....  | 20 |
| 6.4.9  | Test ID #9.....  | 21 |
| 6.4.10 | Test ID #10.....   | 21 |
| 6.4.11 | Test ID #11.....   | 22 |
| 6.4.12 | Effetto del potenziale del guard-ring.....                           | 22 |
| 6.4.13 | Effetto dell'orientamento delle LP.....                              | 23 |
| 7      | Conclusioni e raccomandazioni.....                                   | 24 |

# 1 Indice delle figure

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Sonda di Langmuir CIRA.....  | 6  |
| Figura 2 Sonda di Faraday CIRA.....   | 7  |
| Figura 3 (a) Cup in alluminio per sonda di Faraday CIRA (a); (b) sonda di Faraday nuda (sinistra), sonda di Faraday con cup (destra).....   | 8  |
| Figura 4 Camera al plasma presso il laboratorio INAF/IAPS.....  | 9  |
| Figura 5 Schema della sorgente di plasma di tipo Kaufman utilizzata presso INAF/IAPS.....   | 10 |
| Figura 6 Schema semplificato della catena di misura IAPS.....   | 10 |
| Figura 8 Rack che ospita la catena di misura.....   | 11 |
| Figura 9 Pannello di acquisizione del software di laboratorio IAPS.....   | 12 |
| Figura 10 Pannello di analisi dati del software di laboratorio IAPS.....  | 12 |
| Figura 11 Diagramma di flusso dell'analisi delle caratteristiche I-V.....   | 13 |
| Figura 12 Supporti e cablaggio delle sonde durante la preparazione del setup sperimentale.....  | 14 |
| Figura 13 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday nuda.....       | 16 |
| Figura 14 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -25V, configurazione sonda di Faraday nuda.....       | 16 |
| Figura 15 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -30V, configurazione sonda di Faraday nuda.....       | 17 |
| Figura 16 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -15V, configurazione sonda di Faraday nuda.....       | 17 |
| Figura 17 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -15V, configurazione sonda di Faraday collimata.....  | 18 |
| Figura 18 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.....  | 18 |
| Figura 19 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 30°, Potenziale guard-ring -25V, configurazione sonda di Faraday collimata..... | 19 |
| Figura 20 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 60°, Potenziale guard-ring -30V, configurazione sonda di Faraday collimata..... | 19 |
| Figura 21 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 90°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata..... | 20 |
| Figura 22 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.....  | 20 |
| Figura 23 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.....  | 21 |
| Figura 24 Effetto del potenziale di guard-ring sulle caratteristiche I-V delle FP: nuda (sinistra), collimata (destra).....   | 21 |
| Figura 25 Effetto dell'orientamento delle LP rispetto al fascio: LPO (sinistra), LP1 (destra).....  | 22 |



## 2 Nomenclatura

|               |   |
|---------------|---|
| <i>B</i>      | intensità del campo magnetico, T                              |
| <i>B0</i>     | intensità del campo magnetico al centro della bobina, T       |
| <i>Cd</i>     | coefficiente di spinta  |
| <i>c</i>      | velocità della luce ( $3.0 \times 10^8$ m/s)                  |
| <i>e</i>      | carica elementare ( $1.6 \times 10^{-19}$ C)                  |
| <i>F</i>      | spinta della vela solare, N                                   |
| <i>H</i>      | costante di Plank ( $6.63 \times 10^{-34}$ Js)                |
| <i>J</i>      | corrente, A   |
| <i>k</i>      | costante di Boltzman ( $1.38 \times 10^{23}$ J/K)             |
| <i>L</i>      | distanza di stand-off, m                                      |
| <i>M</i>      | momento magnetico, $Tm^3$                                     |
| <i>Mi</i>     | Numero di Mach degli Ioni                                     |
| <i>mi</i>     | massa del protone ( $1.67 \times 10^{-27}$ kg)                |
| <i>me</i>     | massa dell'elettrone ( $9.11 \times 10^{-31}$ kg)             |
| <i>n</i>      | densità di numero, $m^{-3}$                                   |
| <i>rLi</i>    | raggio di Larmor degli Ioni, m                                |
| <i>Rm</i>     | numero di Reynolds magnetico                                  |
| <i>T</i>      | temperatura del plasma, K                                     |
| $\alpha$      | grado di ionizzazione   |
| $\delta$      | skin-depth, m   |
| $\delta D$    | skin-depth del plasma collisionale, m                         |
| $\mu_0$       | permeabilità magnetica nel vuoto ( $1.26 \times 10^{-6}$ H/m) |
| <i>v</i>      | frequenza collisionale, Hz                                    |
| $\sigma$      | conducibilità elettrica, $1/\Omega m$                         |
| $\omega_{pe}$ | frequenza del plasma, Hz                                      |
| FAV           | Fast Actuating Valve  |
| I/O           | Input/Output  |
| MPD           | Magneto-Plasma-Dynamic arc jet                                |
| MPS           | Magneto-Plasma-Sail   |
| PCI           | Peripheral Component Interconnect                             |
| PFN           | Pulse Forming Network   |
| PIC           | Particle-In-Cell  |
| PXI           | PCI eXtensions for Instrumentation                            |
| SWS           | Solar Wind Simulator  |
| MHD           | Magneto Hydro Dynamic   |

### **3 Introduzione**

Misurazioni della densità di corrente ionica nel plasma o nel fascio ionico di dispositivi di propulsione elettrica per veicoli spaziali sono di grande rilevanza dato che il flusso di ioni espulsi determina le caratteristiche del propulsore come la spinta, l'impulso specifico e l'utilizzo del propellente, nonché le prestazioni dell'intero sistema di propulsione.

Inoltre, una conoscenza accurata e completa della corrente ionica è fondamentale per la validazione di modellazione della plume e per le simulazioni numeriche, per prove di accettazione dei propulsori, per lo studio degli effetti di impianto e per comprendere le interazioni tra plasma e veicolo spaziale.

La densità di corrente ionica può essere misurata utilizzando sonde elettrostatiche che consistono essenzialmente in un elettrodo conduttore, detto collettore, polarizzato ad una tensione negativa rispetto al potenziale locale per respingere gli elettroni.

Esistono diverse configurazioni di sonde composte da un semplice disco metallico fino ad architetture più complesse con collimatori, guard-ring e materiali avanzati.

In questa attività si mettono a confronto tre diverse tipologie di sonde, vale a dire una sonda planare con guard-ring, una sonda planare con collimatore, chiamate anche sonda di Faraday e coppa di Faraday, e due sonde di Langmuir di tipo cilindrico.

Le sonde sono state realizzate nell'ambito del progetto IMP-EP (Impianti per la Propulsione Elettrica) e, in continuità, sono previste nei successivi progetti di propulsione del nuovo Programma Nazionale di Ricerche Aerospaziali (PRORA) - LPEP (Low Power Electric Propulsion) e HPEP (High Power Electric Propulsion) - autorizzati con il DM 662/20.

Gli obiettivi principali di questo studio sono la caratterizzazione delle sonde elettrostatiche CIRA (leve elettrostatiche), la diagnostica di plasma, nonché l'identificazione delle caratteristiche diagnostiche che permettono una più chiara/efficiente valutazione della propulsione. Oltre a fornire raccomandazioni per la corretta progettazione di una sonda di corrente ionica di alta qualità, nonché indicazioni per il funzionamento delle sonde e il trattamento dei dati.

### **4 Scopo del documento**

Questo documento rappresenta una sintesi delle attività sperimentali di caratterizzazione delle sonde intrusive del plasma, svolte presso il laboratorio dell'Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali (IAPS) dell'INAF nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica esistente. L'attività è stata condotta con il supporto del personale IAPS tecnico (Piero Diego, Alfredo Morbidini e Nello Vertolli) e scientifico (Alexandra Parmentier e Emanuele Papini).

## 5 Architettura delle sonde CIRA

Il laboratorio di propulsione elettrica CIRA dispone di un set di sonde elettrostatiche per la diagnostica del plasma. Attualmente sono disponibili 7 sonde di Faraday, installate su un arco rotante ad una distanza regolabile fino a 1 m dal piano di uscita del propulsore. Fanno parte della dotazione anche 3 sonde di Langmuir, che possono essere installate su un supporto in acciaio ancorato al piano di calpestio della camera ad una distanza dal propulsore fino a 3m.

In termini di principio elementare di funzionamento, la sonda di Langmuir consiste essenzialmente in uno o più elettrodi metallici immersi in un plasma a d.d.p. costante o time-varying, dalla cui caratteristica I-V è possibile ricavare, sotto opportune approssimazioni sulle condizioni di plasma, i valori locali di temperatura elettronica, densità ionica e potenziale di plasma. La sonda di Faraday, invece, tipicamente consta di un contenitore di shielding mantenuto al potenziale di plasma (per minimizzare le perturbazioni) e dotato di una piccola apertura attraverso cui si determina l'ingresso di particelle cariche, le quali vanno ad impattare su una coppa interna voltage-biased che funge da collettore di cariche. La coppa è a sua volta collegata ad un elettrometro, che consente il recupero della densità di corrente ionica entro la plume propulsiva, nonché di altri parametri di plasma cui essa è legata (e.g., densità numerica ionica) e altre quantità chiave in cascata, come la divergenza di fascio o l'efficienza del propellente.

Di seguito sono riportati i dettagli costruttivi delle sonde realizzate nell'ambito del progetto IMP-EP.

### 5.1.1 Sonda di Langmuir

Il design delle sonde di Langmuir attualmente in dotazione presso il laboratorio è mostrato in Figura 1.

Ogni Langmuir Probe (LP) in Tabella 1 è costituita da un elemento conduttore, un filo di tungsteno di 0.6 mm di diametro, la lunghezza della parte di filo esposta (3) è di circa 10 mm. La restante parte del conduttore in tungsteno è isolato dal plasma da un primo tubo sottile di allumina (2) lungo 70 mm e diametro 1.5 mm che si innesta in un secondo tubo di allumina (1) di diametro 5mm e lunghezza 195mm. L'holder della sonda è realizzato in acciaio amagnetico ed è provvisto di contatto a vite collegato al filamento di tungsteno e fori filettati per l'ancoraggio meccanico. La lunghezza complessiva della sonda è di 320 mm incluso body.

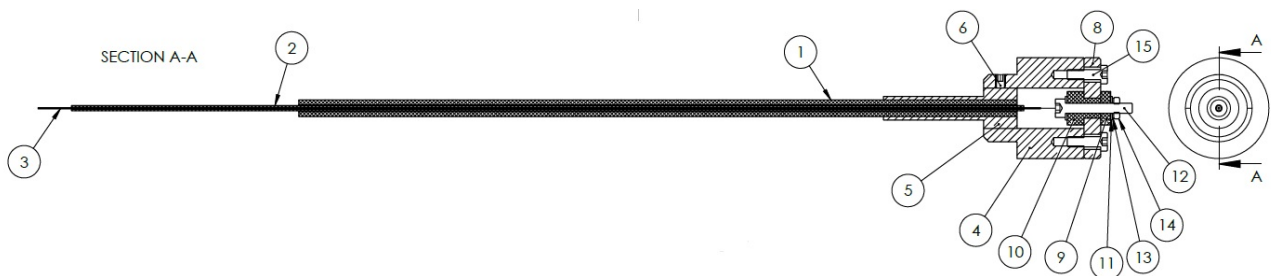


Figura 1 Sonda di Langmuir CIRA

Tabella 1 Dettagli sonda di Langmuir CIRA

| ITEM NO. | PART NUMBER                | DESCRIPTION | QTY. |
|----------|----------------------------|-------------|------|
| 1        | Body Tube                  | Alumina     | 1    |
| 2        | Head Tube                  | Alumina     | 1    |
| 3        | Conducting Rod             | Tungsten    | 1    |
| 4        | Support Body               | SS304       | 1    |
| 5        | Support Tube               | SS304       | 1    |
| 6        | ISO 4026 - M3 x 4-N        | SS304       | 1    |
| 7        | ISO 4029 - M3 x 3-N        | SS304       | 1    |
| 8        | Support Base               | SS304       | 1    |
| 9        | Ceramic Washer 10          | Alumina     | 1    |
| 10       | Ceramic Bushing 10         | Alumina     | 1    |
| 11       | Washer ISO 7089 - 3        | SS304       | 2    |
| 12       | ISO 4762 M3 x 20 - 20N     | SS304       | 1    |
| 13       | DIN 6798-A3.2              | SS304       | 1    |
| 14       | ISO - 4035 - M3 - N        | SS304       | 1    |
| 15       | DIN 7984 - M3 x 10 --- 10N | SS304       | 4    |

### 5.1.2 Sonda di Faraday

L'architettura delle sonde di Faraday CIRA è leggermente più complessa. Essa è assimilabile ad una sonda planare dotata di guard ring, in quanto tale sonda comprende un collettore di ioni circondato da un anello conduttore, come mostrato in Figura 2.

In questo design il collettore di forma di circolare misura 10 mm di diametro ed è circondato da un anello di 15 mm di larghezza. La larghezza dell'anello di protezione deve essere nell'ordine delle dimensioni della guaina di plasma locale per eliminare gli effetti dei bordi. Il collettore e l'anello sono isolati elettricamente. La distanza tra le due parti è di 0.75 mm con una gola profonda 10 mm. Il gap deve rimanere sempre molto al di sotto dello spessore della guaina per evitare discontinuità nella distribuzione del potenziale. La gola attenua il verificarsi di un cortocircuito tra il collettore e l'anello dovuto alla formazione di composti polverizzati.

Il diametro esterno della sonda è di 40 mm e la sua lunghezza rispetto al body è di 18 mm. Il collettore e l'anello hanno ciascuno il loro proprio collegamento elettrico per la polarizzazione e la misurazione della corrente.

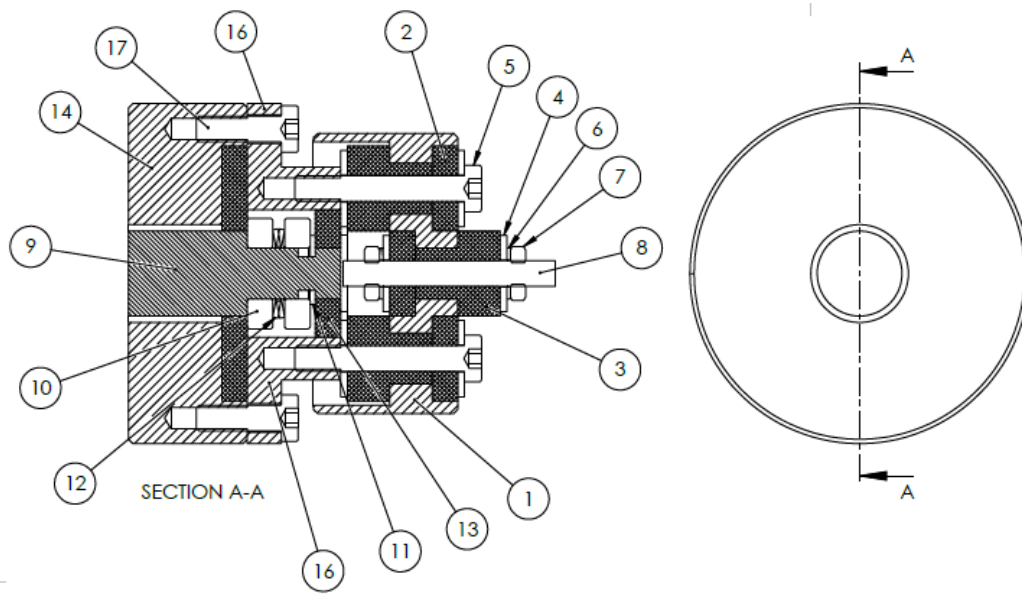


Figura 2 Sonda di Faraday CIRA

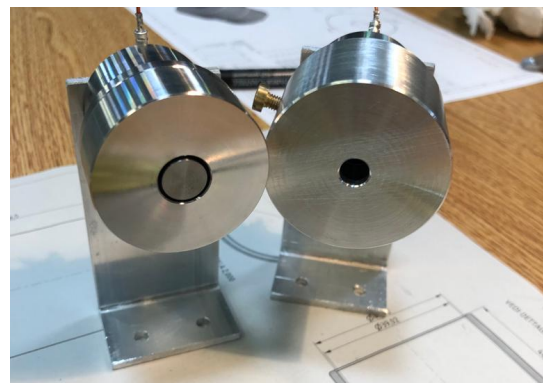
Tabella 2 Dettagli sonda di Faraday CIRA

| ITEM NO. | PART NUMBER                | MATERIAL   | QTY. |
|----------|----------------------------|------------|------|
| 1        | Housing Body               | SS304      | 1    |
| 2        | Ceramic Washer 10          | Alumina    | 5    |
| 3        | Ceramic Bushing 10         | Alumina    | 5    |
| 4        | Washer ISO 7093 - 3        | SS304      | 10   |
| 5        | DIN 7984 - M3 x 20 --- 12N | SS304      | 4    |
| 6        | DIN 6798-A3.2              | SS304      | 2    |
| 7        | ISO - 4035 - M3 - N        | SS304      | 2    |
| 8        | Threaded Bar               | SS304      | 1    |
| 9        | Collector Head             | Molybdenum | 1    |
| 10       | Washer 6                   | Alumina    | 2    |
| 11       | Radial Ring                | SS304      | 1    |
| 12       | Elastic Washer             | SS304      | 2    |
| 13       | Ceramic Washer 15          | Alumina    | 1    |
| 14       | Guard Ring                 | SS304      | 1    |
| 15       | Ceramic Washer 30          | Alumina    | 1    |
| 16       | Guard Support              | SS304      | 1    |
| 17       | DIN 7984 - M3 x 10 --- 10N | SS304      | 4    |

Durante la fase di preparazione dell'attività presso IAPS è stata ripensata la configurazione frontale della sonda di Faraday disponibile presso il CIRA. È stato ritenuto necessario dotare la sonda di un ulteriore schermo elettronico a protezione del collettore, con l'ulteriore vantaggio di poter ampliare le configurazioni di sonde disponibili, aggiungendo una configurazione di sonda collimata. Per questi motivi è stata realizzata presso IAPS una cup in alluminio, a protezione del collettore che assicurasse la continuità elettrica con il corpo del guard-ring, ma non con il body. La cup è dotata di un foro del diametro di 7 mm (leggermente più piccolo del diametro del collettore 10 mm), tra il foro e il collettore intercorre una distanza di 10 mm. In Figura 3 sono mostrati il particolare della cup realizzata e la configurazione completa di sonda collimata a confronto con il design di partenza.



(a)



(b)

Figura 3 (a) Cup in alluminio per sonda di Faraday CIRA (a); (b) sonda di Faraday nuda (sinistra), sonda di Faraday con cup (destra)

## 6 Attività sperimentale presso IAPS

### 6.1 Laboratorio di fisica del plasma e camera al plasma presso IAPS

Il laboratorio IAPS è dotato di una camera a vuoto (Lunghezza 4.5m e Diametro 1.7m) equipaggiata da una sorgente di plasma di tipo Kaufman. Tale sorgente, come riportato in Tabella 3, è in grado di produrre un plasma di Argon con parametri (i.e. densità elettronica e temperatura) prossimi ai valori caratteristici dello strato F della ionosfera. Variazioni della densità del plasma, nella regione a valle della sorgente, possono essere ottenute variando opportunamente la corrente di scarica e il flusso di massa. È importante mettere in luce che il plasma generato dalla sorgente è accelerato in camera a velocità che possono essere regolate in modo tale da poter simulare il moto relativo tra un oggetto orbitante nello spazio e la ionosfera ( $\approx 8$  km/s).

Tabella 3: Confronto fra i parametri del plasma della ionosfera, per differenti quote, e quelli ottenibili in camera nelle condizioni operative tipiche della sorgente.

| Ionosphere |                      |                      |        | Plasma chamber             |                      |        |
|------------|----------------------|----------------------|--------|----------------------------|----------------------|--------|
| h (km)     | p (mbar)             | N (m <sup>-3</sup> ) | Te (K) | p (mbar)                   | N (m <sup>-3</sup> ) | Te (K) |
| 100        | $2.7 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{11}$   | 300    | $\approx 7 \times 10^{-6}$ | $5 \times 10^{11}$   | 1000   |
| 150        | $8.0 \times 10^{-6}$ | $3 \times 10^{11}$   | 1000   |                            | -                    | -      |
| 200        | $1.2 \times 10^{-6}$ | $4 \times 10^{11}$   | 2000   |                            |                      |        |
| 400        | $4.0 \times 10^{-8}$ | $1 \times 10^{12}$   | 3000   |                            | $5 \times 10^{12}$   | 4000   |

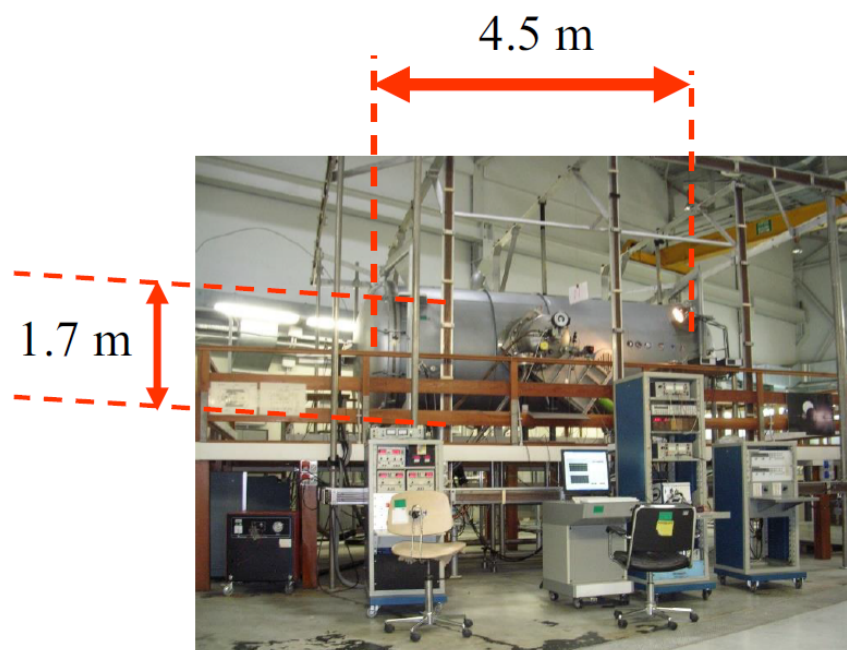


Figura 4 Camera al plasma presso il laboratorio INAF/IAPS.

Il sistema di generazione del vuoto della camera si avvale di una pompa criogenica con velocità di pompaggio di circa 7000 l/s in Argon. Tale caratteristica permette di raggiungere pressioni minime (in assenza di plasma) di circa  $5 \cdot 10^{-7}$  mbar. In condizioni di sorgente attiva, la pressione è funzione del flusso di massa iniettato. In condizioni tipiche di funzionamento (Argon, portata 1 sccm) il livello di pressione interna è di circa  $7 \cdot 10^{-6}$  mbar. Tale valore è sufficiente a garantire che il libero cammino medio molecolare sia maggiore della lunghezza della camera e dunque a rispettare l'ipotesi di non-collisionalità del plasma.

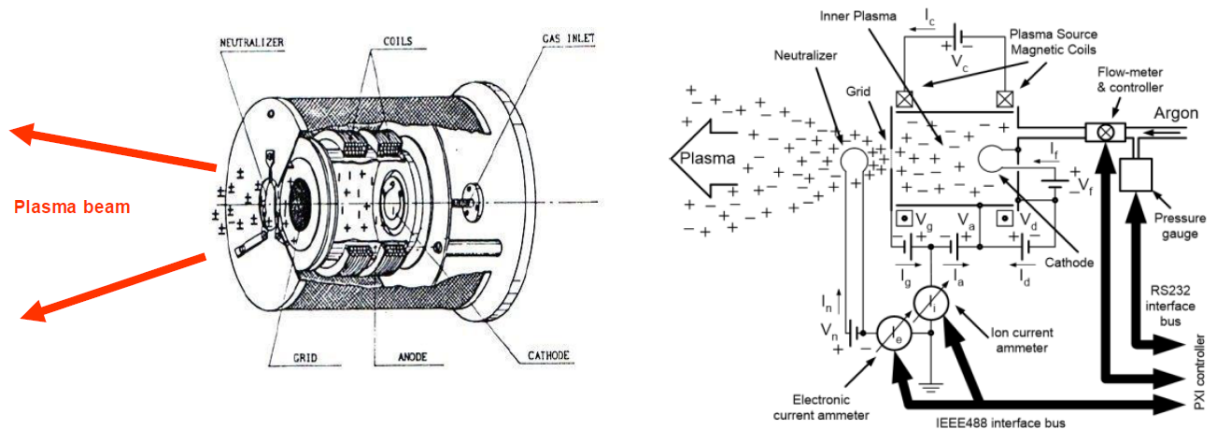


Figura 5 Schema della sorgente di plasma di tipo Kaufman utilizzata presso INAF/IAPS.

## 6.2 Setup Sperimentale

### 6.2.1 Catena di misura

Lo schema semplificato della catena di misura impiegato è riportato in Fig. 6.

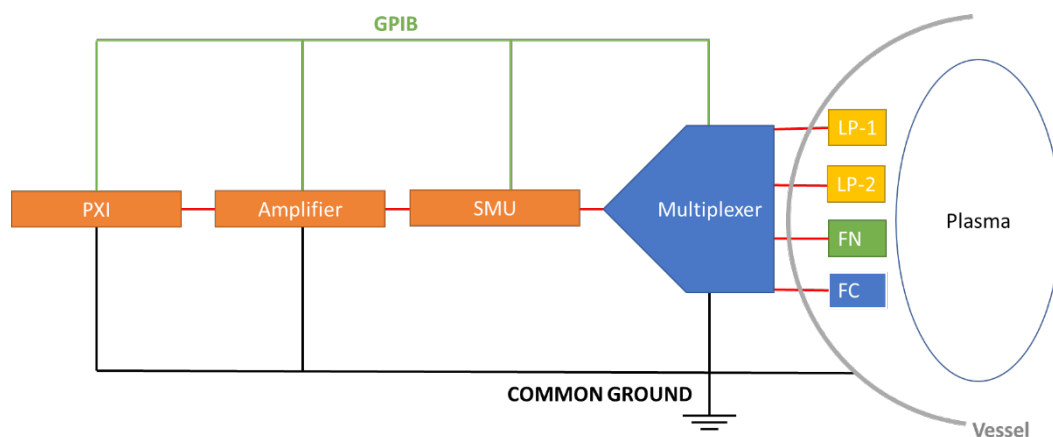


Figura 6 Schema semplificato della catena di misura IAPS

L'intera catena di misura fa riferimento ad un NI-PXI modulare (chassis della National Instruments che alloggia moduli PXI sincronizzati) per la gestione dei segnali di I/O, l'acquisizione delle curve caratteristiche I-V e il calcolo dei parametri del plasma mediante specifico software in ambiente LabView, vedi Figura 6.

L'unità è stata utilizzata in modalità voltage source per applicare lo sweep di tensione necessario per ricavare le curve caratteristiche. Inoltre è supportato da un amplificatore con guadagno programmabile per estendere il range di tensioni applicabili nell'intervallo [-100V, 100V].

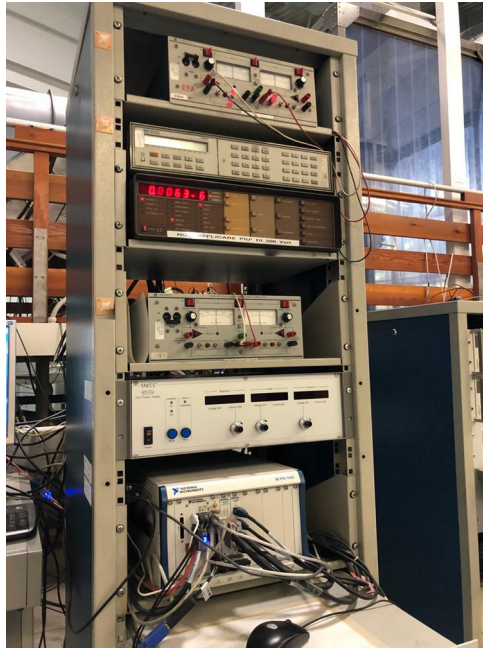


Un source-meter calibrato è stato utilizzato per misurare la corrente raccolta dal set di sonde. Il dispositivo di misura copre un'ampia gamma di correnti e tensioni con un alto grado di stabilità e precisione.

Tra le sonde e la catena di misura fin qui descritta è interposto un selettore di linee (multiplexer) in grado di selezionare i segnali provenienti dalle sonde. Una volta selezionati i segnali vengono raccolti e inviati in una singola linea di uscita.

Il potenziale dell'anello di protezione delle sonde di Faraday è stato applicato utilizzando un ulteriore alimentatore in grado di erogare tensioni fino a  $[-30V, 30V]$ .

Tutti gli strumenti della catena di misura e le sonde sono riferiti ad un potenziale comune e riferiti al potenziale di camera.



*Figura 7 Rack che ospita la catena di misura*

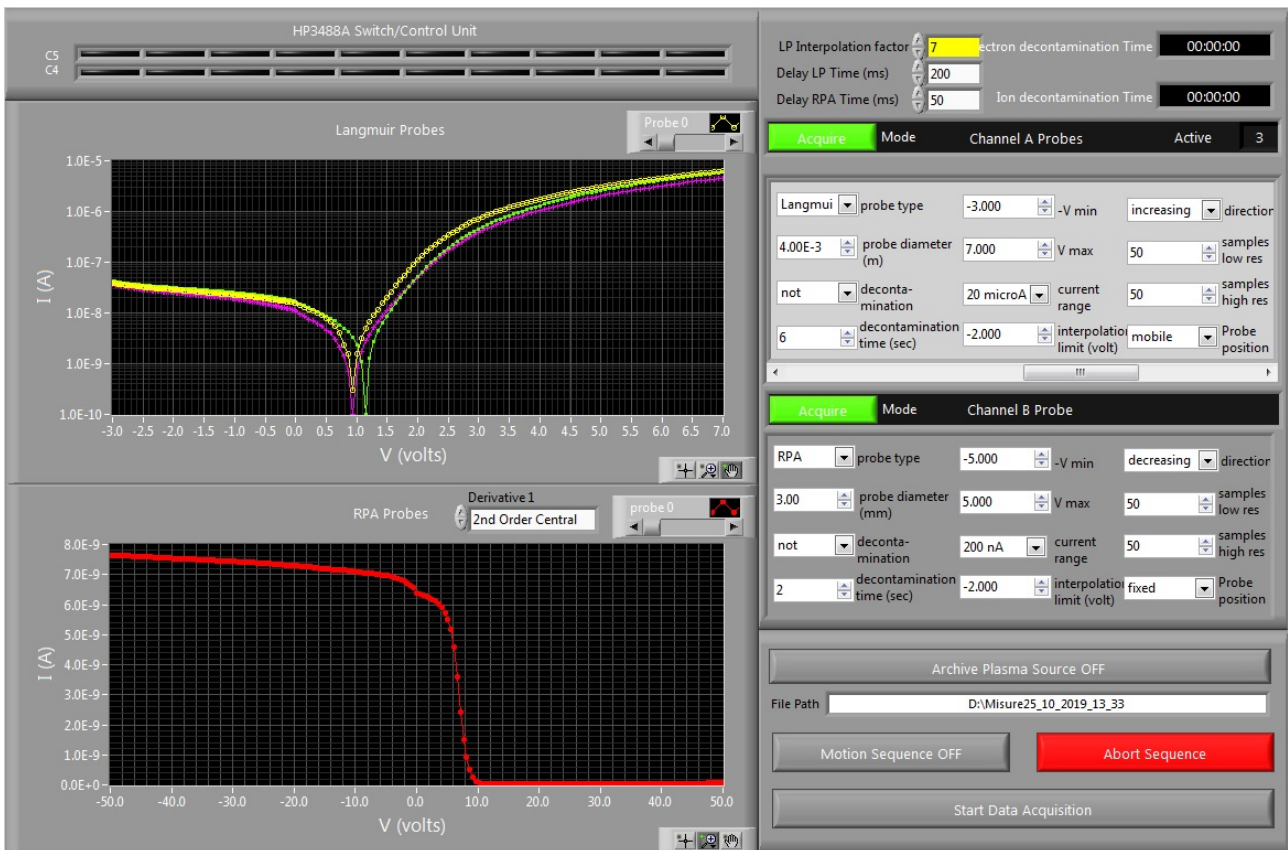
## 6.2.2 Software di acquisizione e analisi dati

Il laboratorio dispone di un software dedicato sviluppato in ambiente LabView in grado di gestire la maggior parte delle funzionalità associate alla camera a vuoto presente nel laboratorio. Ad esempio

- Campo magnetico
- Movimentazione
- Controllo dei livelli di vuoto
- Controllo della sorgente
- Acquisizione dati
- Diagnostica del plasma
- Gestione errori diagnostica

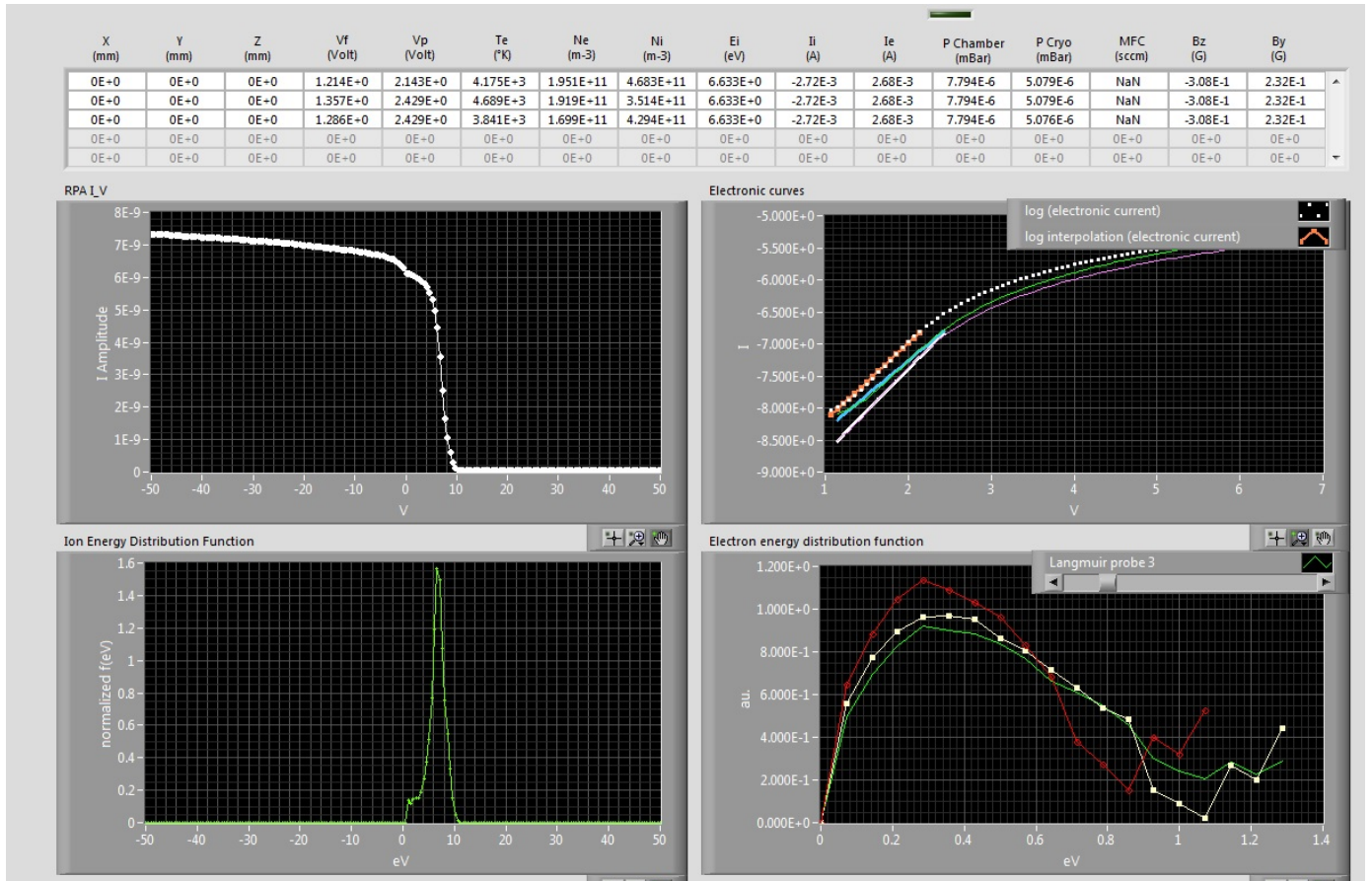
Nel pannello di Acquisizione Dati l'utente può selezionare la tipologia di sonda da acquisire, impostare i rispettivi parametri geometrici caratteristici ed elettrici e configurare le modalità di salvataggio dei dati. Inoltre può visualizzare in tempo reale le curve caratteristiche durante la fase di acquisizione, come mostrato in Figura 8.

Figura 8 Pannello di acquisizione del software di laboratorio IAPS

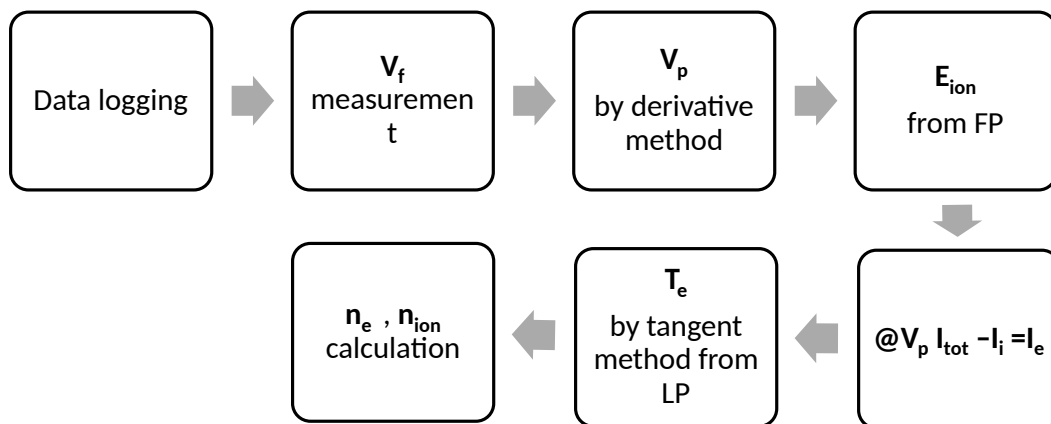


In Figura 9 è mostrato il pannello di analisi dati, a partire dalle curve caratteristiche acquisite il software offre la possibilità di determinare le caratteristiche del plasma in termini di densità, energia, temperatura elettronica, potenziale.

Figura 9 Pannello di analisi dati del software di laboratorio IAPS



La Figura 10 mostra il diagramma di flusso generico dell'analisi delle caratteristiche I-V.



### 6.2.3 Supporto sonde e cablaggio

Le due sonde di corrente ionica e le due sonde di Langmuir sono installate su supporti di alluminio. Il primo è fissato alla parte superiore della camera, mentre il secondo è fissato alla parte inferiore con la possibilità di ruotare rispetto al fascio di plasma di  $[-90^\circ, 90^\circ]$ . La Figura 11 mostra i supporti delle sonde con i 4 strumenti prima della campagna sperimentale.

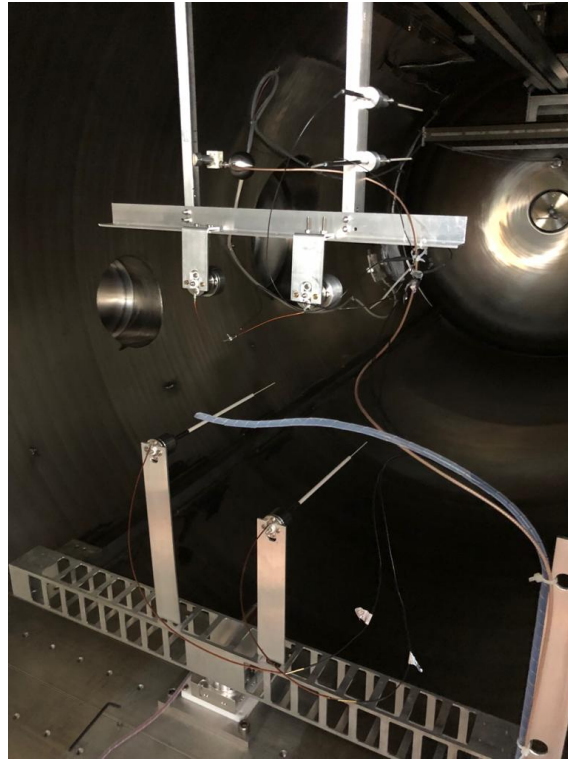


Figura 11 Supporti e cablaggio delle sonde durante la preparazione del setup sperimentale

Tutte le sonde sono situate nel piano ortogonale all'asse della sorgente

Le sonde di Faraday sono posizionate esattamente alla distanza di 3300 mm dal piano di uscita della sorgente e le sonde di Langmuir ad una distanza di 3000 mm.

La distanza tra il centro delle due sonde di Langmuir misura 180 mm. Tale distanza risulta sufficientemente grande da ridurre qualsiasi interferenza e perturbazione tra le sonde.

La corrente raccolta dalle sonde viene trasferita alla catena di misura tramite cavi coassiali da 50 Ohm per garantire una buona trasmissione del segnale elettrico. Le tensioni di polarizzazione sono applicate attraverso gli stessi cavi di collegamento. Ogni cavo è terminato su un passante dotato di connettori BNC lato aria.

L'isolamento tra i vari componenti del setup è stato verificato prima di effettuare le prove.

Durante le misure, l'iniezione di gas (1 sccm di Ar) per alimentare la sorgente produce un incremento della pressione che raggiunge il valore di  $6 \cdot 10^{-6}$  mbar rimanendo, pertanto, nelle condizioni di non collisionalità previste per una corretta simulazione dell'ambiente spaziale.

### 6.3 Strategia di test

In questa attività si mettono a confronto tre diverse tipologie di sonde, vale a dire una sonda planare con guard-ring (FP-N), una sonda planare con collimatore (FP-C) e due sonde di Langmuir di tipo cilindrico (LP0 e LP1) descritte in §5.

Utilizzando la sorgente di plasma in dotazione presso il laboratorio IAPS, per ogni tipologia di sonda si è proceduto con:

- Determinazione delle curve caratteristiche I-V di una coppia di sonde di Langmuir con sweep range [-3V, 7V].
- Determinazione delle curve caratteristiche I-V di una coppia di sonde di Faraday nelle due configurazioni (collimata e non collimata) con sweep range [-3V, 7V].
- Valutazione dell'effetto del potenziale di guard-ring sulle caratteristiche delle due tipologie di sonde di Faraday, [-15V, -20V, -25V, -30V].
- Valutazione dell'effetto dell'orientamento delle sonde di Langmuir rispetto alla sorgente [0°, 30°, 60°, 90°].

I parametri caratteristici della sorgente impiegata sono riportati in 6.1.

In Tabella 4 sono riportati tutti i test point con i relativi parametri e configurazioni.

Tabella 4 Matrice dei test

| TEST ID | NOME FILE | ANGOLO LP [°] | POTENZIALE GUARD-RING [V] | CONFIGURAZIONE FP |
|---------|-----------|---------------|---------------------------|-------------------|
| #1      | 11.53     | 0             | -20                       | N                 |
| #2      | 11.56     | 0             | -25                       | N                 |
| #3      | 12.02     | 0             | -30                       | N                 |
| #4      | 12.07     | 0             | -15                       | N                 |
| #5      | 12.19     | 0             | -15                       | C                 |
| #6      | 12.24     | 0             | -20                       | C                 |
| #7      | 12.28     | 30            | -25                       | C                 |
| #8      | 12.34     | 60            | -30                       | C                 |
| #9      | 12.39     | 90            | -20                       | C                 |
| #10     | 12.48     | 0             | -20                       | C                 |
| #11     | 12.52     | 0             | -20                       | C                 |

## 6.4 Curve caratteristiche I-V

### 6.4.1 Test ID #1

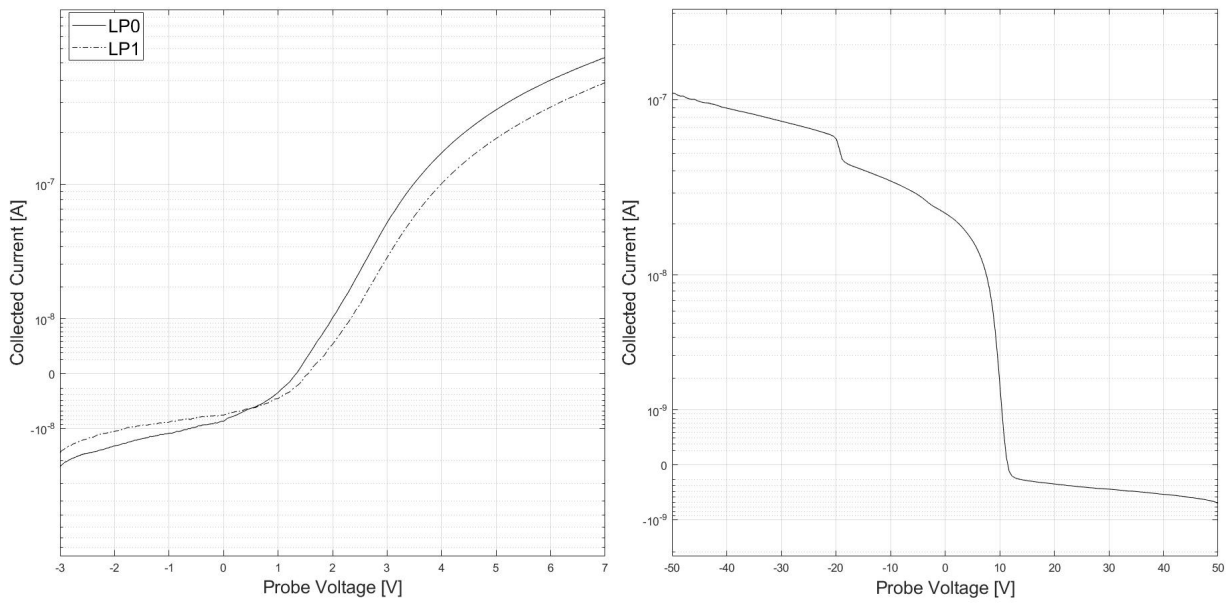


Figura 12 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP  $0^\circ$ , Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday nuda.

### 6.4.2 Test ID #2

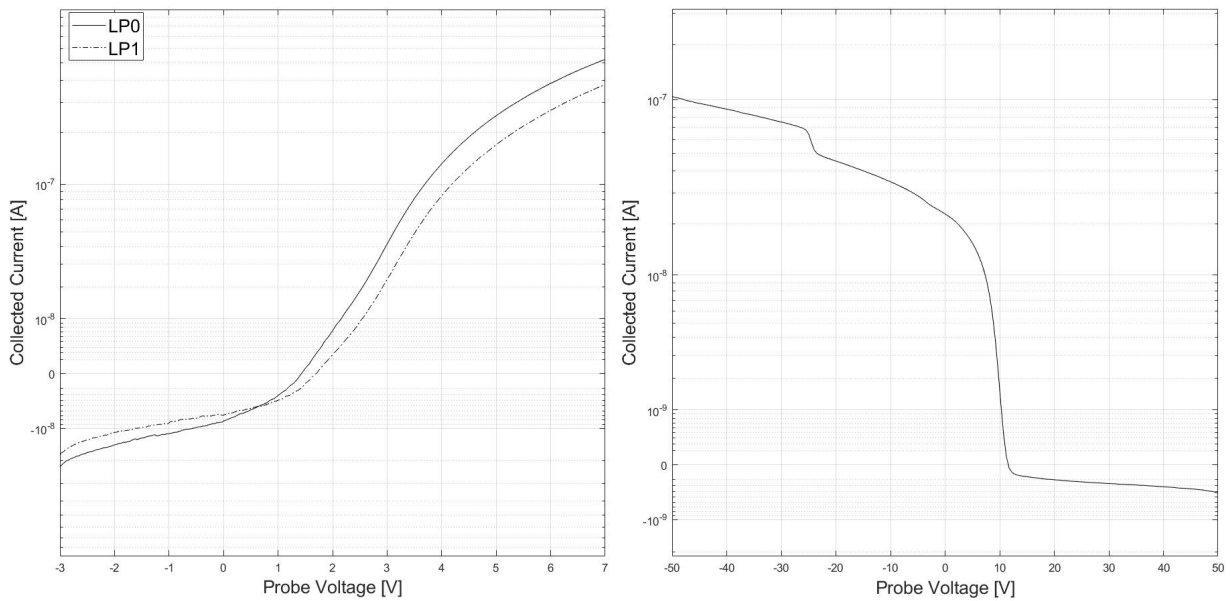


Figura 13 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP  $0^\circ$ , Potenziale guard-ring -25V, configurazione sonda di Faraday nuda.



### 6.4.3 Test ID #3

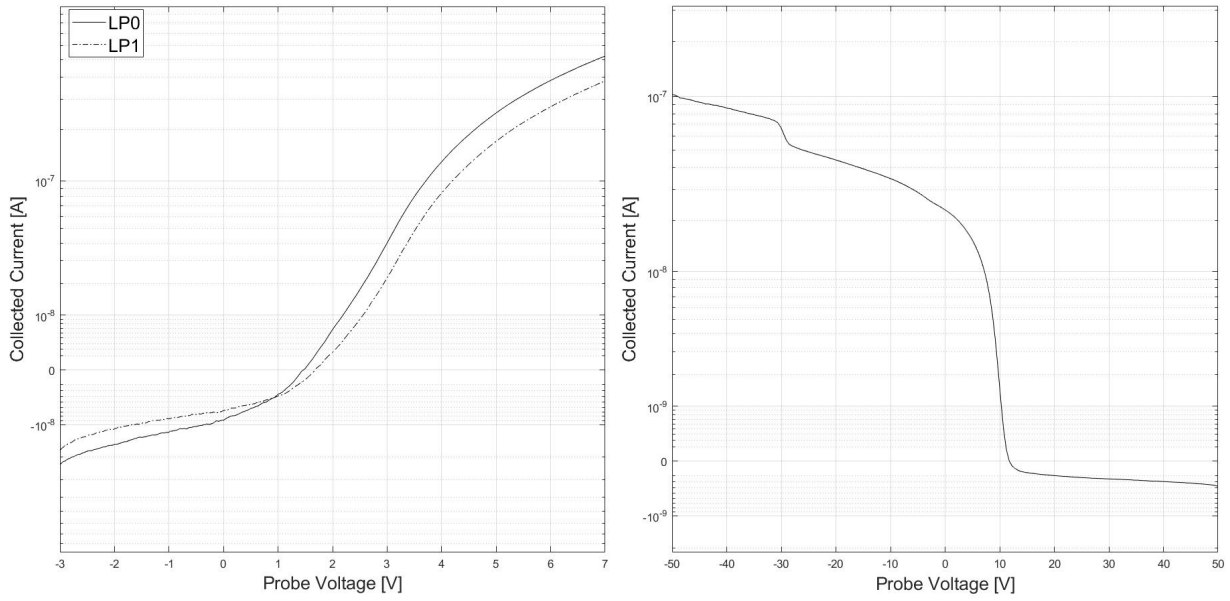


Figura 14 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP  $0^\circ$ , Potenziale guard-ring -30V, configurazione sonda di Faraday nuda.

### 6.4.4 Test ID #4

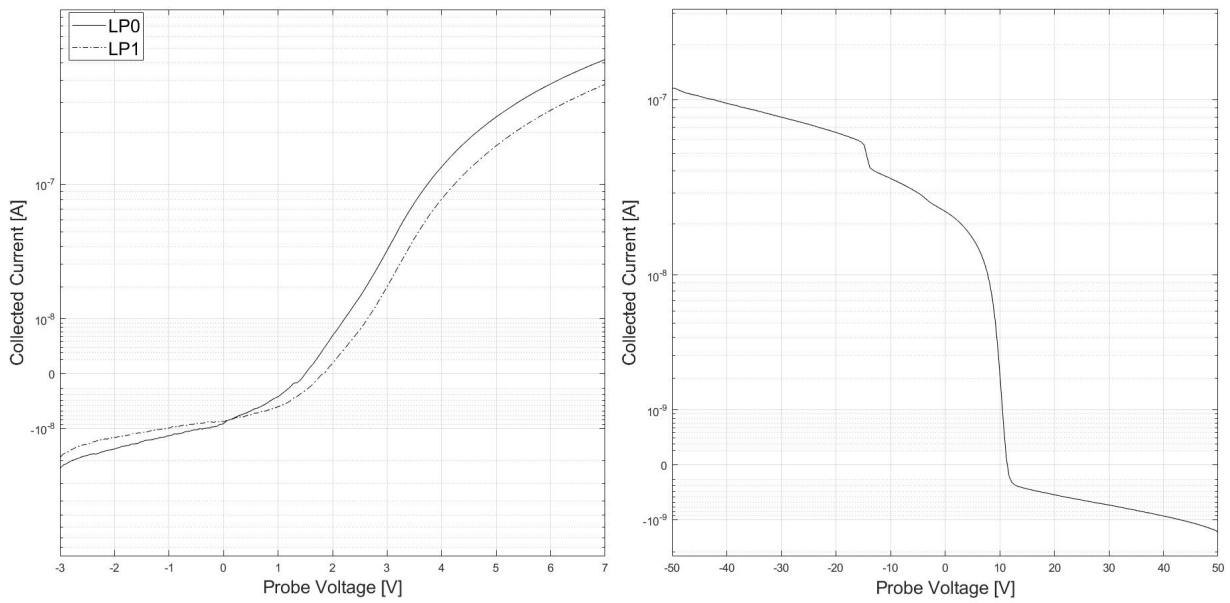


Figura 15 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP  $0^\circ$ , Potenziale guard-ring -15V, configurazione sonda di Faraday nuda.

### 6.4.5 Test ID #5

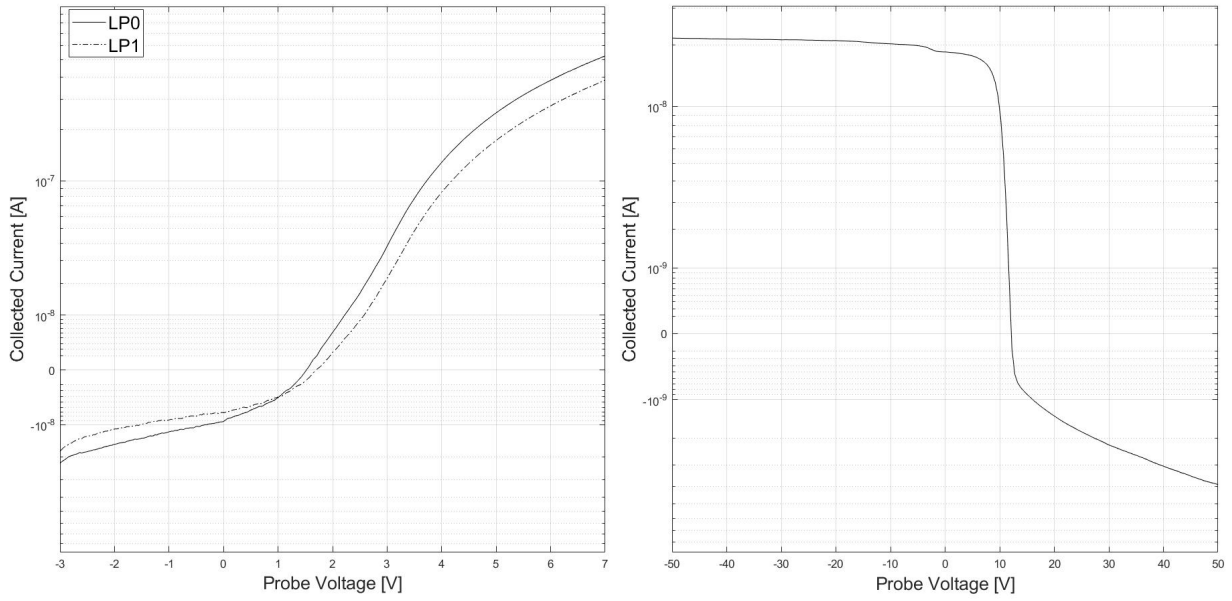


Figura 16 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -15V, configurazione sonda di Faraday collimata.

### 6.4.6 Test ID #6

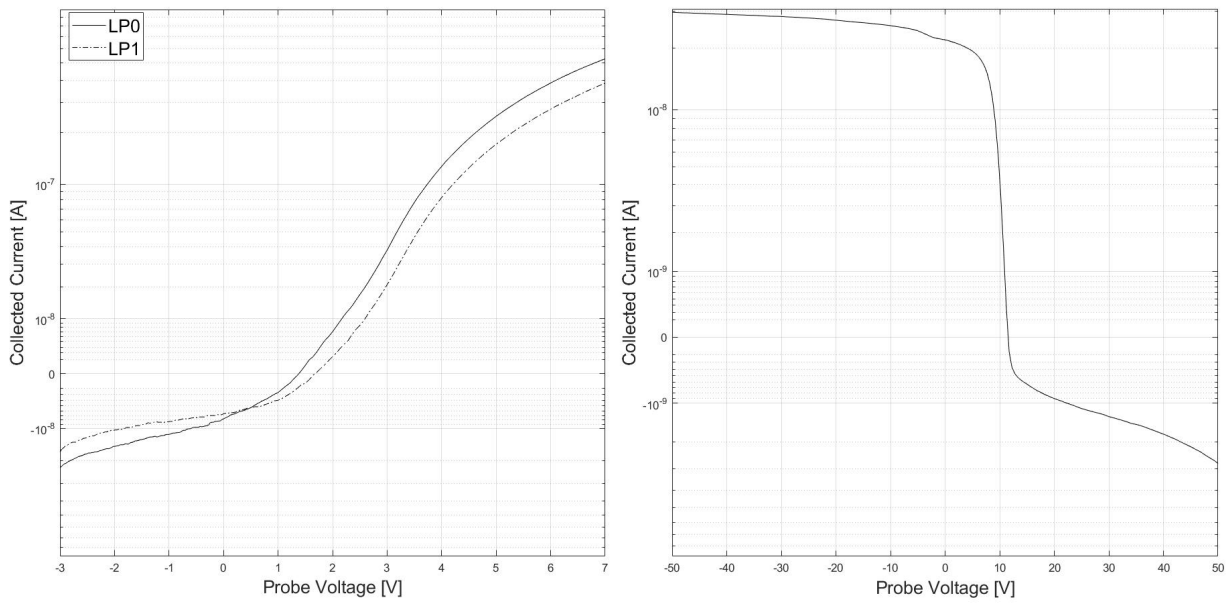


Figura 17 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.



### 6.4.7 Test ID #7

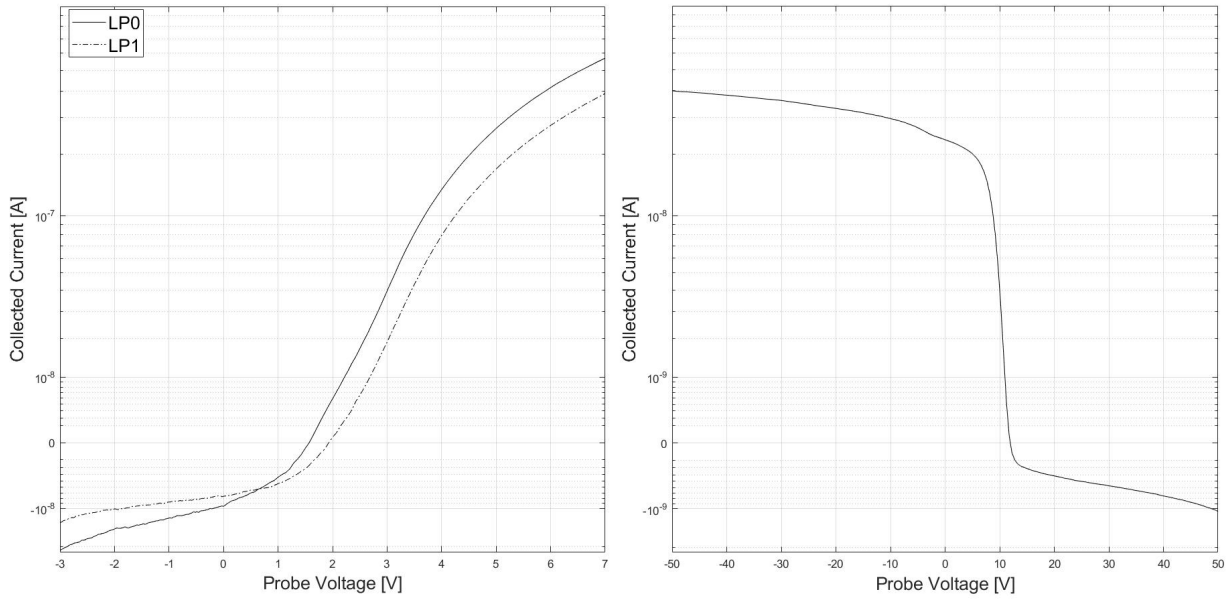


Figura 18 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 30°, Potenziale guard-ring -25V, configurazione sonda di Faraday collimata.

### 6.4.8 Test ID #8

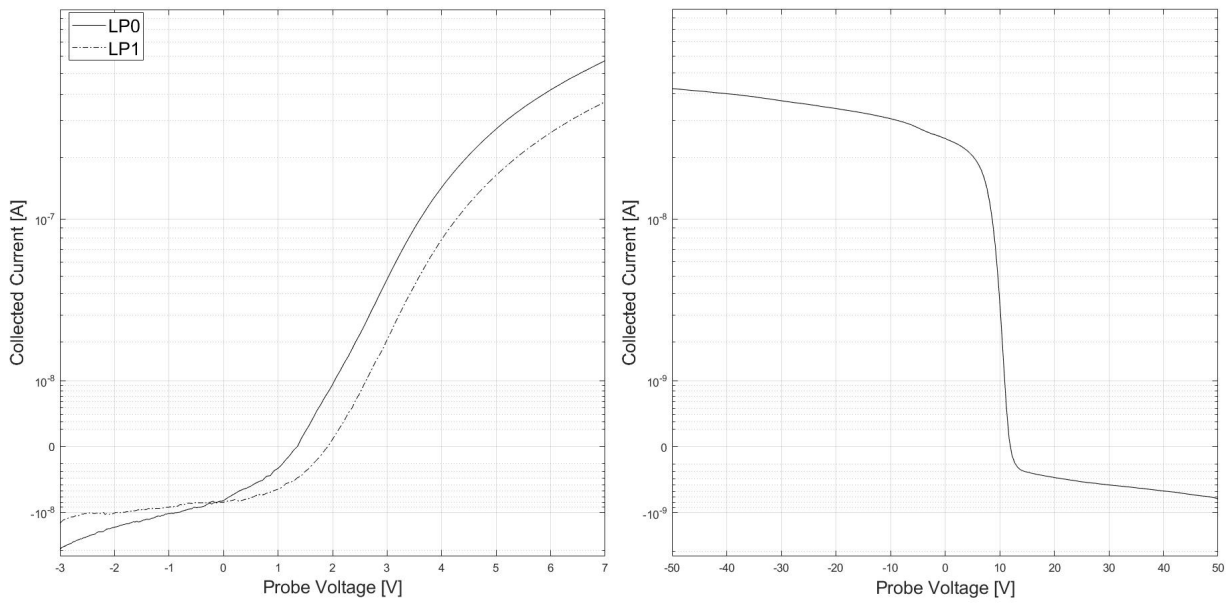


Figura 19 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 60°, Potenziale guard-ring -30V, configurazione sonda di Faraday collimata.

### 6.4.9 Test ID #9

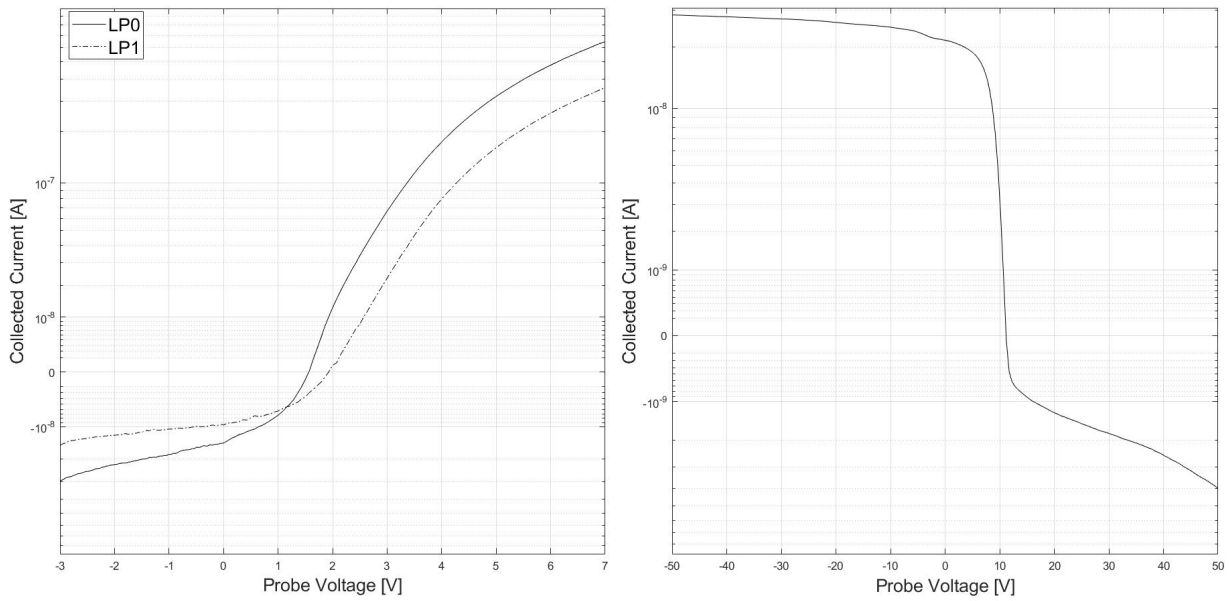


Figura 20 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 90°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.

### 6.4.10 Test ID #10

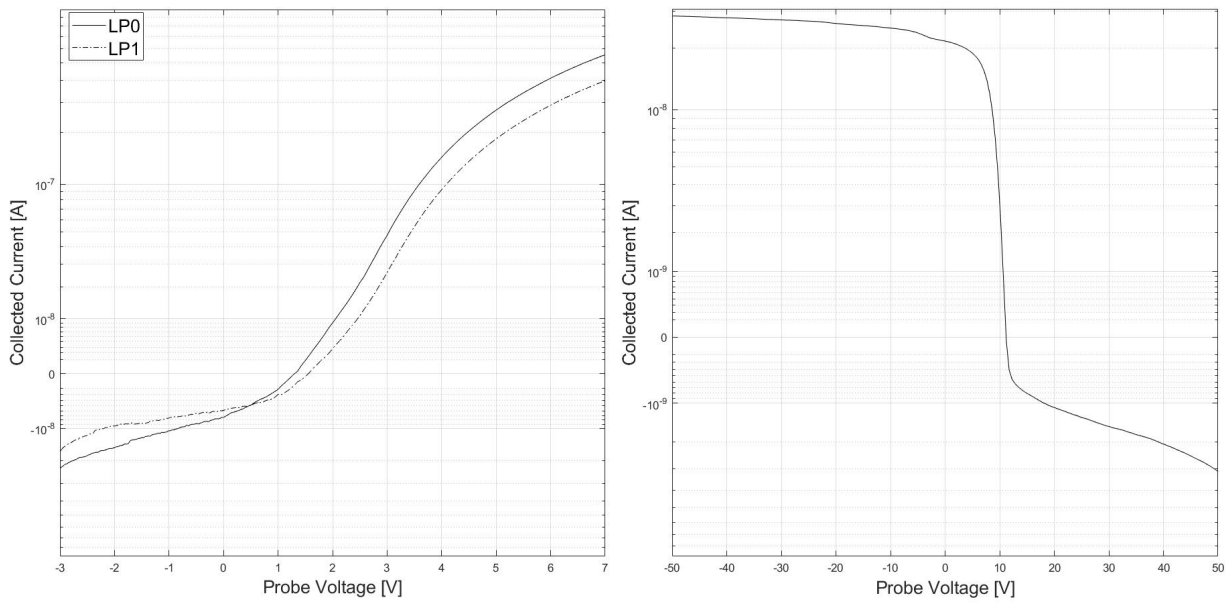


Figura 21 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.

## 6.4.11 Test ID #11

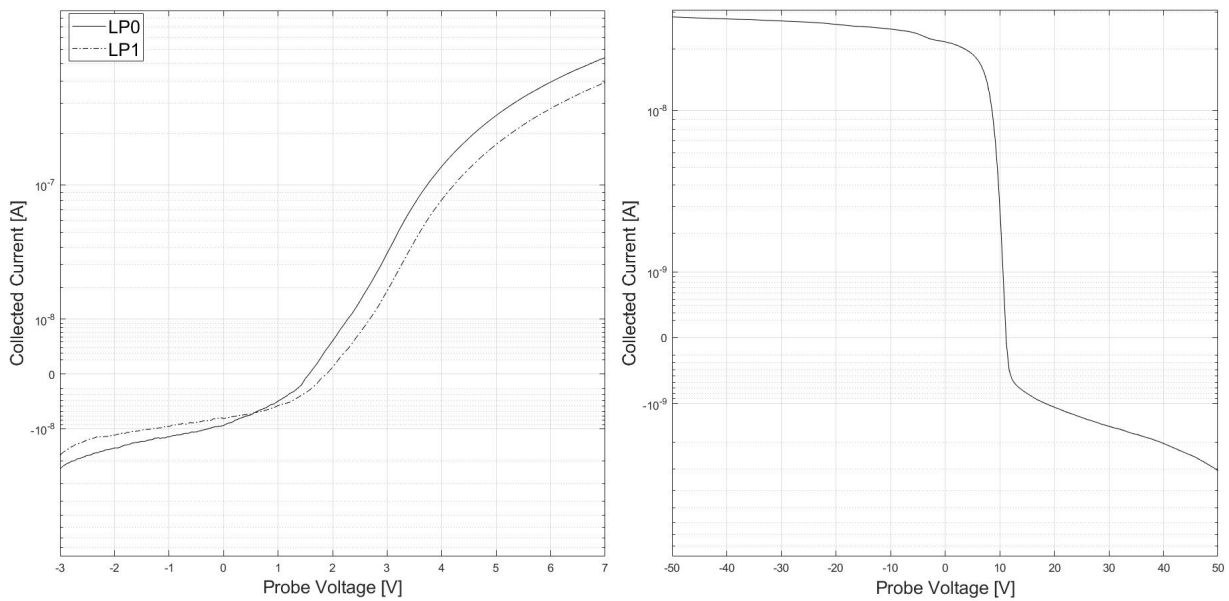


Figura 22 Caratteristiche I-V sonde di Langmuir (sinistra), caratteristica I-V sonda di Faraday (destra). Orientamento LP 0°, Potenziale guard-ring -20V, configurazione sonda di Faraday collimata.

## 6.4.12 Effetto del potenziale del guard-ring

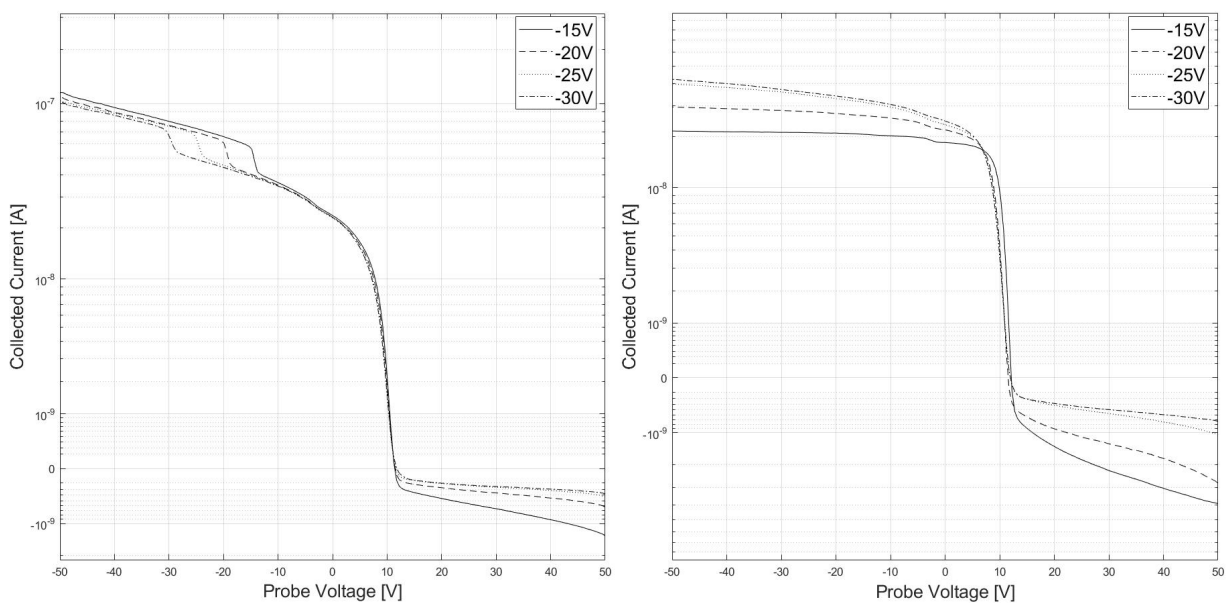


Figura 23 Effetto del potenziale di guard-ring sulle caratteristiche I-V delle FP: nuda (sinistra), collimata (destra)

L'impatto della polarizzazione dell'anello di guardia della FC-N e FC-C è illustrato in Figura 23.

I rami ionico ed elettronico della curva I-V sono stati acquisiti polarizzando il guard ring (o body) per la FC-N e polarizzando sia il guard-ring che il collimatore per la FC-C allo stesso potenziale.

Osservando le caratteristiche della FP-N appare evidente come la variazione del potenziale del guard ring produce uno shift delle curve caratteristiche nell'intervallo di sweep imposto. Tale effetto è ragionevole per una sonda planare di questo tipo, al contrario è possibile osservare che quando la tensione di sonda è pari

al potenziale di guard ring applicato si determina un salto nella curva I-V con conseguente variazione significativa della corrente misurata.

Osservando anche le caratteristiche della FP-C appare evidente come la variazione del potenziale del guard ring produce uno shift delle curve caratteristiche nell'intervallo di sweep imposto. Tale effetto è in linea con quanto misurato per la FC-N, inoltre è rassicurante osservare che una volta applicato il potenziale di guard ring variazioni della tensione di sonda non producono variazioni della corrente ionica.

In sintesi senza collimatore, la corrente raccolta dalla sonda planare aumenta con la tensione all'aumentare dello spessore della guaina con la tensione di sonda.

### 6.4.13 Effetto dell'orientamento delle LP

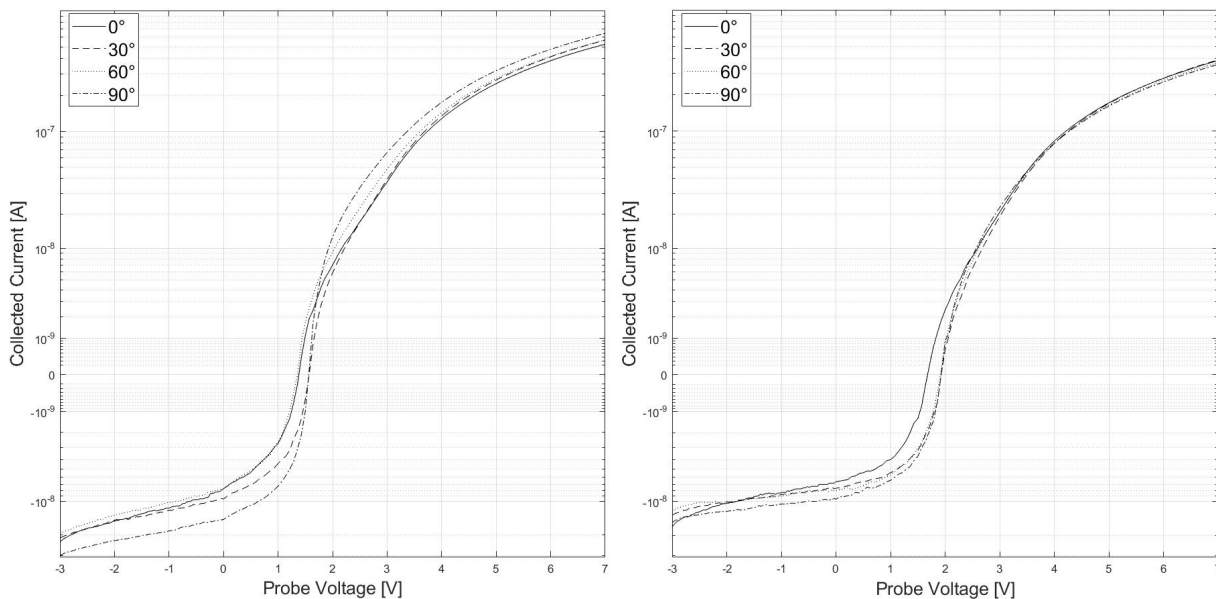


Figura 24 Effetto dell'orientamento delle LP rispetto al fascio: LPO (sinistra), LP1 (destra)

L'impatto dell'orientamento delle sonde di Langmuir LPO e LP1 rispetto alla sorgente è illustrato in Figura 24.

Le sonde sono state orientate ruotandole rispetto alla sorgente da 0 a 90° con passo di 30 gradi. L'effetto si traduce in una variazione delle curve I-V in entrambi i rami (ionico e elettronico). Sebbene l'impatto sia più marcato per la sonda LPO rispetto a LP1, tale differenza è ascrivibile alla tipologia di sonda cilindrica. Infatti la sonda di tipo cilindrico offre un'area esposta al plasma nella parte anteriore dello stelo che varia sensibilmente con l'aumentare del disallineamento con la sorgente. In fase di preparazione del setup è stato infatti proposto, come futuro upgrade e ottimizzazione, l'installazione di una sfera di piccolo diametro (qualche millimetro) all'estremità della sonda per effettuare una conversione da sonda cilindrica a sferica. Tale conversione garantirebbe una migliore insensibilità agli errori di allineamento e semplificazione dei calcoli dei parametri del plasma, nonché un design più semplice.

## 7 Conclusioni e raccomandazioni

La campagna sperimentale eseguita presso IAPS rappresenta la prima caratterizzazione delle sonde realizzate presso CIRA che ha permesso di valutarne le prestazioni. La sorgente al plasma in dotazione al laboratorio IAPS produce un plasma con densità più bassa rispetto a quello prodotto da un propulsore ad effetto Hall (dell'ordine di  $10^{11}$ ), rappresentando per le sonde condizioni di esercizio più gravose rispetto a quelle per le quali sono state progettate e realizzate.

Il laboratorio presso IAPS ha permesso di confrontare tre tipi di sonde elettrostatiche per misurare la corrente ionica profilo angolare, vale a dire una sonda planare con guard-ring (FP-N), una sonda planare con collimatore (FP-C) e due sonde di Langmuir di tipo cilindrico (LP0 e LP1) descritte in §5.

Questo lavoro, consente di fornire un elenco di linee guida, correzioni e regole di buona pratica per le misurazioni dei parametri del plasma prodotto da una sorgente come un propulsore ad effetto Hall e fornisce spunti per l'ottimizzazione del design delle sonde investigate e la loro realizzazione.

Di seguito un elenco, certamente non esaustivo, frutto delle interazioni con il personale IAPS che ha condotto le attività sperimentali e dei risultati sperimentali ottenuti.

- La Faraday probe collimata è preferibile ad una non collimata in quanto la corrente misurata nel ramo ionico è meno sensibile a variazioni della tensione di polarizzazione della sonda (una volta fissato il potenziale del guard ring).
- Il materiale del collimatore deve essere investigato al fine di ridurre emissioni secondarie
- La sonda di Langmuir di tipo cilindrico impone uno stringente requisito di allineamento con la sorgente di plasma, in quanto piccole variazioni di allineamento producono significative variazioni della superficie esposta al plasma.
- È necessario investigare la necessità di dotarsi di sonde di Langmuir di tipo sferico per svincolarsi da errori di allineamento e semplificare il calcolo dei parametri del plasma (determinazione area esposta).
- È necessario verificare che le viterie e minuteria impiegate per l'assemblaggio delle sonde siano costituite di materiale amagnetico. (small-magnet test).
- Le misurazioni devono essere eseguite con una pressione di fondo molto bassa (rimanere al di sotto di  $10^{-5}$  mbar). Anche la qualità del vuoto è un criterio rilevante.
- E' preferibile una camera a vuoto di grandi dimensioni per ridurre al minimo l'effetto della facility: diametro del propulsore  $\ll$  raggio della camera e lunghezza.
- Le pareti del vessel devono essere riferite al potenziale di terra (o potenziale di riferimento).
- La misurazione deve essere eseguita ad una distanza significativa dal piano di uscita anteriore del propulsore/sorgente in modo tale che l'ipotesi di sorgente puntiforme resti valida.
- L'allineamento degli strumenti rispetto al propulsore/sorgente deve essere accuratamente verificato.
- È necessario un elevato livello di pulizia degli strumenti di misura. L'isolamento elettrico deve essere verificato prima e dopo le misurazioni. Tutti i cavi devono essere protetti dal plasma.
- La catena di misura e il sistema DAQ devono essere calibrati (sorgente di tensione, misuratore di corrente, convertitore analogico-digitale).
- Il propulsore/sorgente deve funzionare in regime stazionario (equilibrio termico dei componenti principali, stabile corrente di scarica e spettro di potenza).