

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**  
**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

---

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA*

DESIGN E REALIZZAZIONE DI UNA SORGENTE DI MICROPLASMA

Elaborato in:

Applicazioni Industriali dei Plasmi – M

Candidato:

Andrea Caizzi

Relatore:

Prof. Matteo Gherardi

Correlatori:

Prof. Romolo Laurita

Dr. Filippo Capelli

Dr. Giulia Laghi

Dr. Michele Vasile

Sessione III

Anno Accademico 2022-2023

# SOMMARIO

<b>1. Introduzione</b> .....	<b>4</b>
1.1 Metamateriali.....	4
1.1.1 Caratteristiche generali.....	4
1.1.2 Cenni storici.....	6
1.1.3 Metamateriali ed Elettromagnetismo .....	7
1.1.3.1 Metamateriali left-handed.....	10
1.1.4 Stato dell'arte.....	13
1.1.4.1 Cloaking devices .....	14
1.1.4.2 Applicazioni ottiche.....	16
1.1.4.3 Applicazioni antisismiche.....	18
1.2 Metasuperfici.....	19
1.2.1 Principio di Huygens.....	20
1.2.2 Caratteristiche generali.....	20
1.2.3 Classificazione .....	22
1.2.4 Stato dell'arte.....	23
<b>2. PULSE</b> .....	<b>26</b>
2.1 Obiettivi del progetto .....	26
2.2 Plasma as host material .....	27
2.3 Plasma as meta-atoms or part of them .....	28
2.4 Aree di applicazione del progetto .....	31
2.4.1 Limiti delle tecnologie attuali .....	31
2.4.2 Meta-tecnologie esistenti.....	32
2.5 Premesse del lavoro di tesi.....	34
<b>3. Materiali e Metodi</b> .....	<b>35</b>
3.2 Descrizione prototipi realizzati.....	35
3.1.1 Prototipo uno.....	35
3.1.2 Prototipo due.....	36
3.1.3 Generatori .....	40
3.1.4 Prototipo tre .....	41
3.2 Set-up e caratterizzazioni elettriche.....	42
3.2.1 Amazing One .....	43
3.2.2 Discussione risultati .....	46
3.2.3 Confronto Amazing One ed AlmaPULSE con resistenze .....	50

3.2.4 Discussione risultati .....	54
3.3 Sviluppi futuri.....	59
<b>4. Conclusioni .....</b>	<b>62</b>
<b>5. Bibliografia .....</b>	<b>63</b>
<b>6. Appendice .....</b>	<b>66</b>

# 1.INTRODUZIONE

Il lavoro di tesi presentato si inserisce all'interno di PULSE<sup>[1]</sup> (Plasma reconfigurable metaSurface Technologies), un progetto europeo di durata triennale a cui l'Università di Bologna ha preso parte insieme ad altre realtà sia accademiche che industriali provenienti da Italia, Spagna, Finlandia, Grecia e Belgio in cui ci si pone l'ambizioso obiettivo di definire un nuovo orizzonte tecnologico per l'implementazione di dispositivi elettromagnetici riconfigurabili unificando i domini di ricerca delle metasuperfici con la fisica del plasma. Questo connubio scientifico punta alla creazione di "meta dispositivi" in grado di rispondere ai requisiti sempre più stringenti dei sistemi di telecomunicazione di nuova generazione sfruttando le funzionalità senza precedenti di sistemi a base plasma. Le competenze riguardanti tale progetto sono interdisciplinari, complementari e caratterizzate dall'adeguatezza delle attrezzature di tutti i soggetti coinvolti nei settori scientifici e tecnologici.

## 1.1 METAMATERIALI

I metamateriali sono materiali creati artificialmente con proprietà peculiari, che li differenziano dagli altri. Essi sono, attualmente, una delle aree di ricerca più interessanti dato che le proprietà che si possono ottenere sono inesistenti in natura. Negli ultimi venti anni, alcuni dei fenomeni previsti dapprima solo teoricamente, come l'invisibilità, la rifrazione negativa e le super-lenti, sono stati ampiamente dimostrati in diversi sistemi. Molte strade restano tuttavia tanto inesplorate quanto potenzialmente rivoluzionarie e, dati i progressi delle tecnologie di fabbricazione, l'unico limite sembra essere la nostra capacità di immaginare nuove geometrie, nuovi fenomeni e quindi nuovi metamateriali.

### 1.1.1 Caratteristiche Generali

Le caratteristiche macroscopiche dei metamateriali dipendono in particolare dalla geometria realizzativa, in altri termini un metamateriale guadagna le sue proprietà dalla sua struttura piuttosto che direttamente dalla sua composizione chimica. Il termine *metamateriale* fu coniato nel 1999 da Rodger M. Walser dell'Università del Texas ad Austin. Egli li definì come:<sup>[2]</sup>

*“Compositi macroscopici aventi un'architettura tridimensionale cellulare periodica e sintetica progettata per produrre una combinazione ottimizzata, non disponibile in natura, di due o più risposte a una specifica sollecitazione.”*

Il termine deriva dall'unione della parola greca μετά, meta, inteso come “oltre”, con la parola latina materia, materiale. Fu proposto nel 1999 dal primo citato Rodger M. Walser <sup>[3]</sup> per esprimere il desiderio di creare materiali artificiali il cui comportamento, a fronte di sollecitazioni esterne, andasse oltre i limiti naturali dei materiali compositi. Da allora il concetto di metamateriale è in continua e rapidissima espansione, e i campi di applicazione si sono moltiplicati di pari passo con le proprietà dei nuovi metamateriali tanto che il concetto stesso è stato riformulato talmente tante volte che darne una definizione universale e univoca, ad oggi, non è ancora possibile. Raccogliere e discutere questi tentativi fu l'oggetto delle pubblicazioni di Ari Sihvola <sup>[4,5]</sup>, dell'università di Helsinki. Questi notò come il confine tra ciò che si chiama metamateriale e altre tipologie di strutture, sia ancora molto labile, essendo le definizioni spesso incomplete, vaghe, discordanti o, ancora peggio, troppo generali, senza dimenticare, tra l'altro, che Sihvola trattò il problema parlando solo dei metamateriali elettromagnetici, trascurando completamente quelli acustici e le loro applicazioni. Sihvola nei suoi articoli riporta che le seguenti diciture sono presenti in tutte le definizioni di metamateriale e possono pertanto considerarsi caratterizzanti:

- I metamateriali presentano proprietà non osservabili nei materiali che li costituiscono. Essi sono costituiti da altri omogenei o da loro miscele dalle proprietà note in cui però la loro geometria e disposizione nello spazio causa “l'emergere”, a livello globale, di proprietà diverse rispetto a quelle dei costituenti;
- I metamateriali presentano proprietà non osservabili in natura. Questa affermazione è molto più controversa della prima perché, a seconda del punto di vista da cui viene letta potrebbe portare a due obiezioni. La prima è che si potrebbe pensare che i metamateriali siano in qualche modo qualcosa di innaturale, quando in realtà sono dei materiali ingegnerizzati per rispondere ad una funzione specifica, e l'ingegnerizzazione è un processo effettuato sfruttando le leggi della natura. Il secondo è che qualunque materiale artificiale (plastiche, leghe, ecc..) e moltissimi oggetti fatti dall'uomo presentano delle caratteristiche non osservabili in natura, e pertanto questa non può essere una frase utilizzabile per definire un materiale. Si può uscire dall'impasse specificando come per “proprietà” si intendano parametri quantificabili che nei metamateriali assumono valori particolari.
- I metamateriali presentano una struttura periodica o reticolare. Essi, pertanto, presentano una “molecola” o cella, detta una unità fondamentale che si ripete nel piano o nello spazio. Non è stato ancora stabilito se la periodicità sia una caratteristica necessaria o se sia solo una consuetudine ingegneristica, ovvero una necessità di ordine legata all'omogeneità. Talvolta, infatti, non è nemmeno specificato se, o quanto, la periodicità abbia un'influenza sulle caratteristiche volute dal metamateriale. Secondo alcune fonti questa caratteristica non è necessaria per la definizione <sup>[6,7]</sup>.

Sihvola, alla luce della sua analisi, non formula una definizione ma le considerazioni appena esposte danno una buona idea di cosa si parlerà da qui in avanti.

### 1.1.2 Cenni Storici

Il vero e proprio esordio e successivo sviluppo dei metamateriali come idea prima e come campo di ricerca in seguito, prima ancora dei tentativi di definizione elencati ed analizzati precedentemente, risale agli studi compiuti da scienziati in un periodo a cavallo del XIX e XX secolo. Queste prime ricerche riguardarono la porzione del visibile dello spettro elettromagnetico (e.m.), riportato in figura 1.1, in cui gli studiosi osservarono tutta una serie di fenomeni collegati con l'interazione tra la radiazione e.m. e la materia, ponendo un focus particolare sulla polarizzazione della luce. Nel visibile, il cui spettro d'onda è riportato in figura 1.2, furono individuati alcuni comportamenti delle onde e.m. e fisici ed ingegneri iniziarono a prendere in considerazione la possibilità di riprodurre quanto osservato nella banda del visibile a frequenze più ridotte, come ad esempio nella porzione di spettro delle microonde. Per raggiungere tale obiettivo era necessario trovare delle strutture che recitassero il medesimo ruolo svolto dalle molecole con le onde e.m. della banda del visibile e cominciò così a farsi strada l'idea di fabbricare artificialmente dei materiali con le proprietà desiderate. Dovendo agire su onde e.m. dalle frequenze più basse e quindi dalla lunghezza d'onda maggiore, tali materiali dovevano presentare delle strutture dalle dimensioni maggiori rispetto a quelle relative all'interazione nel visibile e non essendo presenti in natura era necessario fabbricarli ex novo, utilizzando per esempio delle inclusioni metalliche all'interno di uno strato dielettrico.

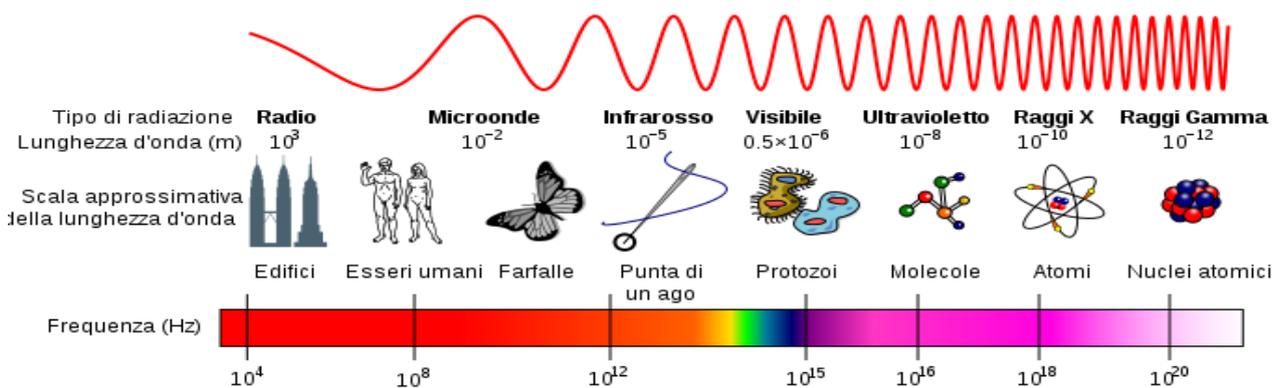


Figura 1.1: Spettro della radiazione elettromagnetica

Andando nello specifico, per la luce visibile, la cui la lunghezza d'onda è tipicamente minore di un micrometro, le strutture sono generalmente la metà di questa dimensione o più piccole, solitamente meno di 280 nanometri. Per la radiazione delle microonde, le strutture necessitano solo che siano

sull'ordine di un decimetro. I metamateriali che devono interagire con le microonde sono di solito costruiti come schiere (*arrays*) di elementi elettricamente conduttivi che hanno caratteristiche induttive e capacitive idonee.

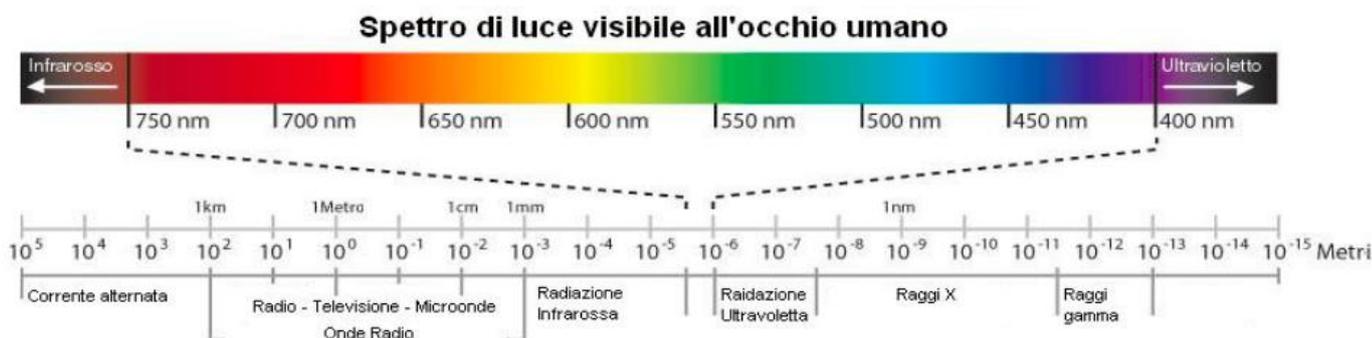


Figura 1.2: Focus sulla parte di spettro visibile all'occhio umano

Le continue innovazioni tecnologiche hanno portato alla realizzazione del primo metamateriale caratterizzato da un indice di rifrazione negativo nel 2000 presso l'università di San Diego. Tale evento è considerato come l'atto ufficiale di apertura dell'era dei metamateriali (anche se le proprietà di un materiale di questo tipo erano già state teorizzate e studiate dal fisico russo Veselago nel 1968). Dato che, in particolare negli ultimi 15 anni, la ricerca sui metamateriali ha subito una notevole accelerazione, l'interesse si è andato a diversificare in più branche sia a livello di letteratura scientifica sia in termini di potenziali campi di applicazione, con uno sforzo particolare nella realizzazione di dispositivi di mascheramento per frequenze sempre più ampie ed a lunghezze d'onda ottiche. Tramite l'utilizzo di tali materiali è possibile fabbricare assorbitori, sensori, superlenti e perfezionare tecnologie con ricadute nel settore energetico e militare con implicazioni anche nel monitoraggio ambientale, nell'elettromagnetismo, nell'aerospazio e nelle telecomunicazioni evidenziando come i campi di applicazione siano potenzialmente molteplici e diversificati. L'interesse in questo campo di ricerca è dimostrato dal fatto che negli ultimi vent'anni c'è stata un'esplosione di articoli sull'argomento e i campi di applicazione sono sempre in aumento.

### 1.1.3 Metamateriali ed Elettromagnetismo

In questa tesi ci si concentrerà nello specifico su metamateriali con proprietà elettromagnetiche peculiari. Questi in particolare, artificialmente prodotti in laboratorio, sono composti da celle elementari disposte in modo che la loro geometria e l'ordine spaziale riescano a modificare l'interazione con le onde elettromagnetiche o di altro genere, così da fornire a questi materiali delle caratteristiche uniche.

I ricercatori, nel campo dell'elettromagnetismo, spesso usano il termine metamateriale in modo abbastanza ristretto per quei materiali che rivelano una *rifrazione negativa*, ovvero un indice di rifrazione  $N < 0$ . Per arrivare a definire ciò, bisogna passare dalle leggi di Maxwell in cui sono celati due importanti elementi per la definizione dei metamateriali nell'ambito elettromagnetico e non solo.

Le proprietà elettromagnetiche dei materiali sono descritte dalle leggi di Maxwell, riportate in tabella 1.3.

Tabella 1.3: Equazioni di Maxwell

<i>Equazioni di Maxwell</i>			
	<i>Forma differenziale</i>	<i>Forma integrale</i>	<i>Significato fisico</i>
<i>Legge di Coulomb</i>	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$	Esistono le sorgenti del campo elettrico, cioè punti da cui nascono le linee di forza
<i>Legge di Ampere</i>	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \right)$	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( i_{conc} + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$	Una variazione di campo elettrico (o corrente) genera un campo magnetico
<i>Legge di Gauss</i>	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	Non esistono le sorgenti del campo magnetico
<i>Legge di Faraday</i>	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	Una variazione nel tempo del flusso di campo magnetico genera un campo elettrico

- E: vettore intensità di campo elettrico;
- B: campo di induzione magnetica;
- J: densità di corrente;
- $\rho$ : densità di carica;
- $\epsilon_0$ : costante dielettrica nel vuoto;
- $\mu_0$ : permeabilità magnetica nel vuoto;

In particolar modo, come rappresentato in figura 1.4, i materiali possono essere distinti sulla base dei valori di  $\mu$  (permeabilità magnetica) e di  $\epsilon$  (permettività elettrica).

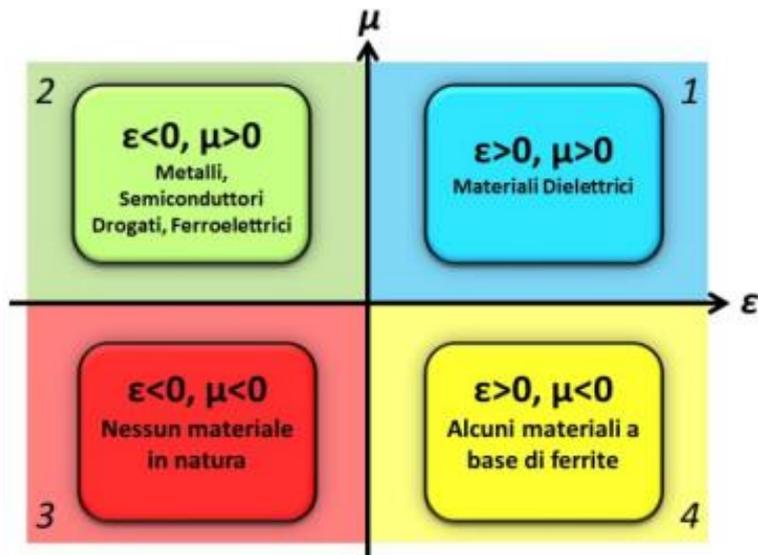


Figura 1.4: Distinzione dei materiali basata sui valori che i coefficienti  $\mu$  e  $\varepsilon$  assumono

Di particolare interesse, sono i materiali che hanno  $\mu$  e  $\varepsilon$  entrambi negativi, in quanto, in natura non ne esistono. L'invenzione dei metamateriali nasce proprio dallo studio teorico del comportamento di materiali con queste caratteristiche basandosi su un'idea molto semplice, ovvero quella di ricreare in laboratorio materiali dalle proprietà ingegnerizzabili a piacimento, partendo da materiali comuni ma organizzandoli in singoli elementi, chiamati meta-atomi. La risposta del metamateriale sarà il risultato del comportamento collettivo di tutti i meta-atomi. Alcuni esempi di configurazioni assumibili dai meta-atomi sono mostrate in figura 1.5.

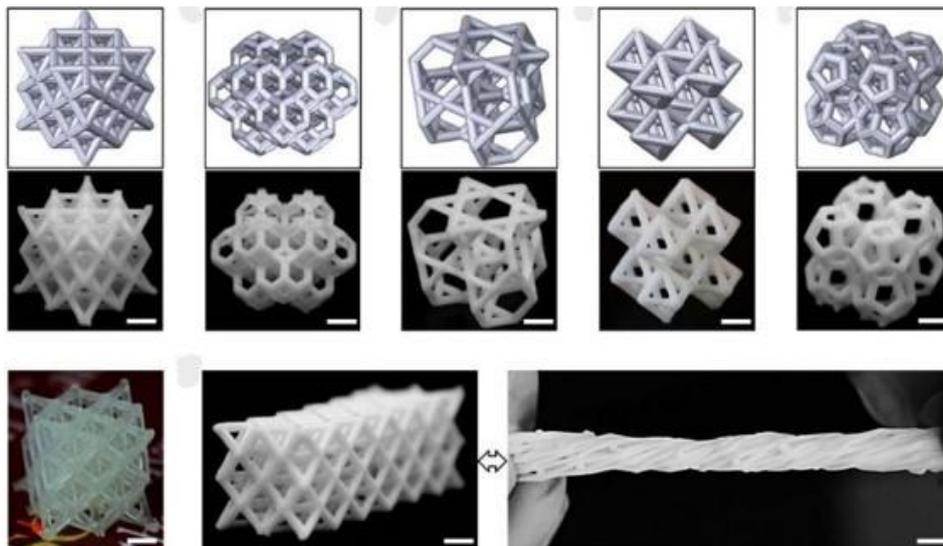


Figura 1.5: Varie configurazioni che i meta-atomi possono assumere

Una delle più grandi potenzialità dei metamateriali è la possibilità quindi di creare una struttura con permittività elettrica e permeabilità magnetica entrambe negative, in quanto, come visto in precedenza, questa proprietà non viene trovata in nessun materiale naturale. Quasi tutti i materiali che si incontrano ad esempio in ottica, come vetro o acqua, hanno valori positivi sia per la permittività elettrica ( $\epsilon$ ) che per la permeabilità magnetica ( $\mu$ ). Molti metalli, come argento e oro, hanno  $\epsilon$  negativo alle lunghezze d'onda visibili. Un materiale avente invece o  $\epsilon$  o  $\mu$  negativo (ma non entrambi) risulta essere opaco alla radiazione elettromagnetica [8]. Nella pratica, per comodità, è spesso usato l'indice di rifrazione  $N$  definito da:  $N = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$ .

Ad ogni modo, sappiamo che alcuni metamateriali progettati hanno  $\epsilon < 0$  e  $\mu < 0$ , siccome il prodotto tra  $\epsilon$  e  $\mu$  risulta essere quindi positivo,  $N$  è reale. In tali circostanze, è necessario prendere la radice quadrata negativa per  $N$ .

I metamateriali con  $N$  negativo hanno numerose proprietà sorprendenti e sono definiti *left-handed*.

### 1.1.3.1 Metamateriali Left-Handed

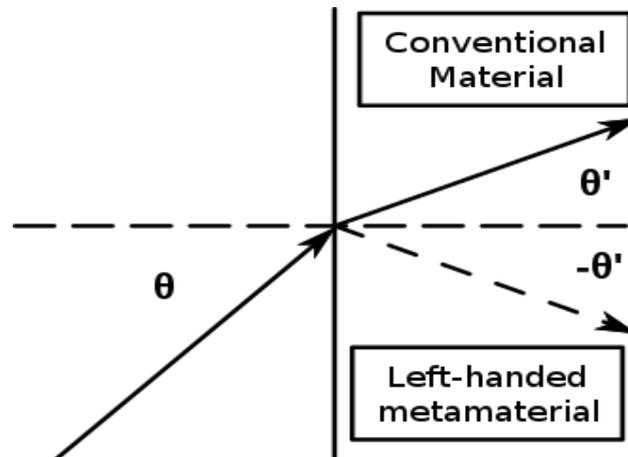
I materiali *left-handed* (LH) furono per la prima volta descritti teoricamente da Victor Veselago nel 1967 [23][24]. Questi sono materiali che hanno proprietà opposte a quelle dei materiali *right-handed*: la costante dielettrica e la permeabilità magnetica sono entrambe negative. Questo significa che la luce si propaga in questi materiali nella direzione opposta al campo elettrico e al campo magnetico. I materiali *left-handed* sono anche chiamati materiali negativi o sinistrorsi per il fatto che, se si usa la regola della mano destra per determinare la direzione del vettore di Poynting si ottiene la direzione opposta alla propagazione della luce. Per un materiale *left-handed* quindi la regola della mano destra non viene rispettata, permettendo a un'onda elettromagnetica di trasportare energia (avere una velocità di gruppo) nella direzione opposta alla sua velocità di fase.

In fisica la velocità di fase è la velocità con cui si propaga la fase di un'onda, sia essa elettromagnetica o meccanica. La velocità di fase può essere visualizzata come la velocità di propagazione di una cresta dell'onda ma non coincide necessariamente con la velocità di propagazione di un segnale (che è più propriamente descritta dalla velocità di gruppo).

Oltre a ciò, come preannunciato nel paragrafo precedente, questi materiali hanno numerose proprietà sorprendenti:

- La legge di Snell vale ancora. L'equazione correlata è la seguente:  $N_1 \sin\theta_1 = N_2 \sin\theta_2$ , dove  $N_1$  e  $N_2$  rappresentano gli indici di rifrazione di due mezzi attraversati dalla luce con un

angolo di incidenza ed uno di rifrazione rispetto all'interfaccia tra essi  $\theta_1$  e  $\theta_2$ . Questa equazione risulta essere ancora valida ma con  $N_2$  negativo, i raggi saranno rifratti sullo stesso lato della normale penetrante il materiale come mostrato in figura 1.6.



*Figura 1.6: Nel caso in cui  $\epsilon < 0$  e  $\mu < 0$  la radiazione incidente seguirà un percorso differente nel passaggio dal mezzo 1 al mezzo 2 vedendo il fascio incidente in parte riflesso ed in parte trasmesso, ma ad un angolo opposto rispetto a quello che si avrebbe in un mezzo tradizionale*

- L'effetto Doppler è rovesciato: cioè, una sorgente di luce muovendosi verso un osservatore sembra ridurre la sua frequenza.
- La radiazione di Čerenkov è invertita. Questa è un tipo di radiazione elettromagnetica emessa quando una particella carica, come un elettrone, si muove attraverso un mezzo dielettrico (come l'acqua distillata) ad una velocità maggiore della velocità di fase della luce in quel mezzo. Ciò sembrerebbe impossibile ma in un mezzo denso, la velocità di fase della luce risulta più bassa di quella nel vuoto e sarà  $c/n$  (con  $c$  rappresentante la velocità della luce nel vuoto ed  $n$  l'indice di rifrazione del mezzo in questione). Può avvenire quindi che una particella superi la velocità di fase della luce nel mezzo e se è carica elettricamente si verifichi l'effetto Čerenkov. Questa radiazione elettromagnetica si propaga in un fronte sferico creando, come nell'aria quando un oggetto supera il muro del suono, un cono d'onda simile al cono di Mach per le onde meccaniche. Una figura esemplificativa del fenomeno è riportata di seguito.

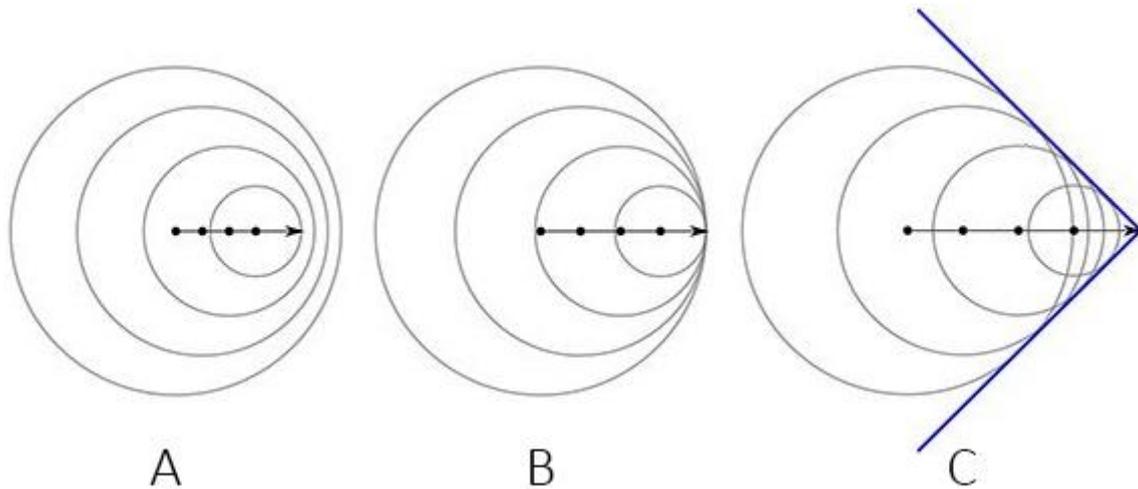


Figura 1.7: L'immagine illustra tre scenari distinti per una particella carica che si muove in un mezzo trasparente con una velocità  $v_p < c/N$ . Nel caso A, la particella è più lenta della luce del mezzo. Il caso B corrisponde al caso limite dove  $v_p = c/N$  iniziando la radiazione di Čerenkov. Nel caso C la particella è più veloce della luce nel mezzo  $v_p > c/N$  creando un cono di radiazione visibile.

- Il vettore di Poynting (la cui direzione indica il flusso di energia elettromagnetica) è antiparallelo alla velocità di fase. Questo significa che i fronti d'onda si muovono in direzione opposta al flusso di energia.

John Pendry fu il primo a teorizzare una maniera pratica di realizzare un metamateriale *left-handed* (LHM). La sua idea iniziale era che i fili metallici allineati lungo la direzione di propagazione potrebbero fornire un metamateriale con permittività negativa ( $\epsilon < 0$ ). Da notare che, comunque, i materiali naturali, come quelli ferroelettrici, erano da sempre conosciuti come aventi permittività negativa, la sfida fu quella di costruire un materiale che mostrasse anche permeabilità negativa ( $\mu < 0$ ). Nel 1999 Pendry dimostrò che un anello aperto (forma a 'C') con il suo asse posto lungo la direzione della propagazione dell'onda potrebbe fornire una permeabilità negativa. Nello stesso documento, mostrò che un array periodico di fili ed anelli potrebbe dare origine a un indice di rifrazione negativo. Per le onde piane che si propagano in tali metamateriali, il campo elettrico, il campo magnetico e il vettore d'onda seguono la regola della mano sinistra di Fleming.

Comunque, le strutture LH progettate dopo il 2002 furono prive di senso pratico per le applicazioni a microonde perché la loro larghezza di banda applicabile era troppo stretta e i loro coefficienti di trasmissione lenti.

### 1.1.4 Stato dell'Arte

Di seguito saranno presentati alcuni esempi di metamateriali e relative applicazioni sviluppate dal secolo scorso fino ad ora.

W.E. Kock sviluppò i primi metamateriali nei tardi anni '40 con antenne a lente metallica<sup>[9]</sup> e lenti a ritardo metallico<sup>[10]</sup>. Le antenne con lente metallica, mostrate in figura 1.8, sono un tipo di antenne direzionali che usano una struttura metallica a forma di lente per concentrare le onde elettromagnetiche provenienti da una sorgente puntiforme. Queste antenne sono utilizzate per applicazioni che richiedono una grande larghezza di banda e una buona efficienza di irradiazione, come la comunicazione satellitare, il radar e la radioastronomia. Le lenti a ritardo metallico invece sono un tipo di lenti che sfruttano il fenomeno della rifrazione negativa, cioè la capacità di deviare i raggi luminosi in direzione opposta a quella normale. Queste lenti sono costituite da una struttura periodica di elementi metallici, come fili o anelli, che interagiscono con le onde elettromagnetiche e creano una differenza di fase tra i raggi trasmessi e quelli riflessi. La loro proprietà più importante è quella di formare immagini virtuali ingrandite di oggetti reali. Alla Duke University Pratt School of Engineering e all'Imperial College di Londra è stato realizzato un metamateriale con indice di rifrazione negativo rispetto alle microonde con un array di piccole antenne risonanti metalliche di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda delle microonde. Il metallo utilizzato come materiale non ha la proprietà dell'indice di rifrazione negativo, ma la assume come metamateriale con quella particolare struttura geometrica. Altre applicazioni le troviamo nei campi dell'ottica e delle microonde come nuovi tipi di beam steerers, modulatori, filtri passa banda, lenti, accoppiatori di microonde e molto altro.

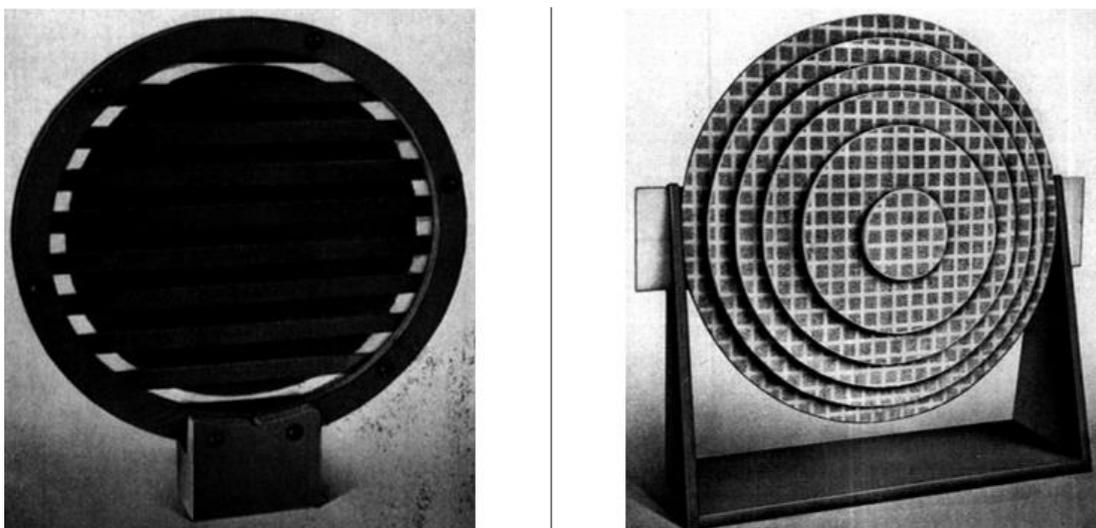


Figura 1.8: Immagini di due antenne a lente metallica pensate a metà del XX secolo

Un altro ambito potrebbe riguardare la manipolazione di frequenze comprese tra i 300 GHz e i 10 THz. Queste frequenze non possono essere gestite dalle apparecchiature elettroniche convenzionali per via della frequenza eccessivamente elevata ma allo stesso tempo hanno frequenze troppo basse per essere gestite dalle apparecchiature ottiche. Ricercatori del Los Alamos National Laboratory, utilizzando dei metamateriali, sono riusciti a manipolare segnali entro questo intervallo di frequenze. Si pensa si possano utilizzare in futuro metamateriali per l'occultamento di velivoli o navi ai radar e alla radiazione ottica ed infatti, secondo la rivista *PhysicsWorld*, ci sarebbe un progetto del Britannia Royal Navy College di ottenere ciò in dieci anni sfruttando la rifrazione negativa <sup>[11]</sup>. Eleftheriades *et al.* (2002), e Caloz *et al.* (2002) fornirono un metodo per realizzare metamateriali *left-handed* usando elementi artificiali caricati su linee di trasmissione nella tecnologia a microstrip <sup>[12][13]</sup>.

#### 1.1.4.1 Cloaking Devices

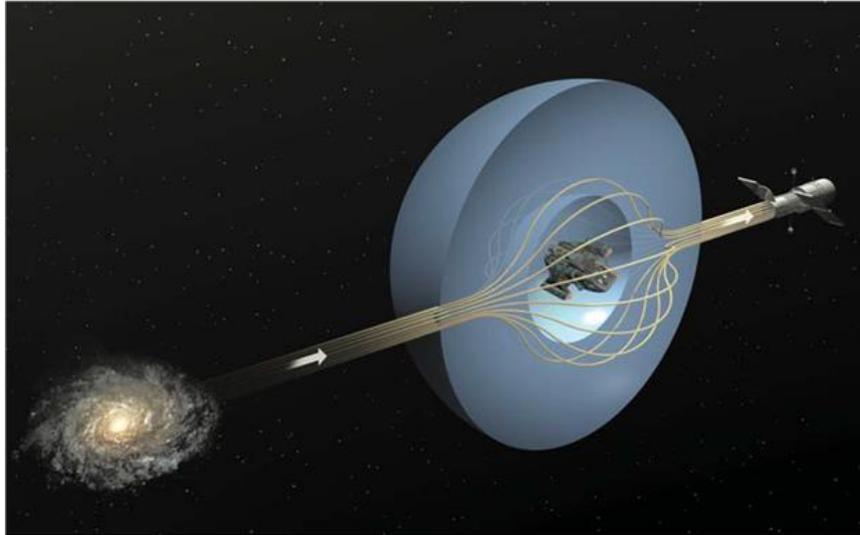
I metamateriali possono anche essere un punto di partenza possibile per costruire dispositivi mascheranti o dispositivi di occultamento (*cloaking device*), il che li rende molto funzionali oltre che affascinanti. Un tale dispositivo coinvolge gli oggetti circostanti coprendoli, mascherandoli con una “conchiglia” che simula nei suoi pressi il passaggio di luce <sup>[14]</sup>. Proprio in questa direzione il 14 febbraio del 2005, Andrea Alù e Nader Engheta all'Università della Pennsylvania pubblicarono un documento di ricerca nel quale si sosteneva che i plasmoni potessero essere usati per neutralizzare la luce visibile o la radiazione proveniente da un oggetto. Lo schermo plasmonico sarebbe sintonizzato a un oggetto che si tiene nascosto, sopprimendo solo una specifica lunghezza d'onda. Per fare un esempio, un oggetto reso invisibile alla luce rossa sarebbe ancora visibile nella multi-lunghezza d'onda della luce del giorno. Un concetto per un dispositivo mascherante fu proposto da due matematici su uno dei giornali della Royal Society nel Regno Unito <sup>[15]</sup> a cui seguì l'inizio dei programmi per la costruzione di un dispositivo mascherante che furono resi pubblici su *Science* da ricercatori degli Stati Uniti e Regno Unito <sup>[16]</sup>. Ad ogni modo, gli scienziati non coinvolti nel lavoro dissero che i progetti sembravano fattibili, ma avrebbero richiesto materiali più progrediti che allo stato attuale non esistevano <sup>[17]</sup>. Nell'ottobre del 2006, un gruppo di scienziati britannici e statunitensi creò un metamateriale che rendeva un oggetto invisibile alla radiazione delle microonde <sup>[18]</sup> e ciò venne considerato il primo passo verso un dispositivo mascherante per la luce visibile. Il 2 aprile del 2007, due ingegneri della Purdue University annunciarono un progetto teorico per un dispositivo mascherante ottico basato sul concetto britannico del 2006 costituito da un apparato di minuscoli aghi progettati per rendere un oggetto come fosse dentro un manto invisibile ad una lunghezza d'onda di

632.8 nanometri <sup>[19]</sup>. La Duke University e l'Imperial College London stanno attualmente facendo ricerche riguardo a questo uso di metamateriali e sono riusciti a nascondere un oggetto allo spettro delle microonde utilizzando speciali anelli concentrici <sup>[20]</sup>.



*Figura 1.9: Stealth ships, navi militari invisibili ai radar nemici. Si prevede che con il progredire della tecnologia riguardante i metamateriali si potranno progettare navi e aerei in ambito militare invisibili anche all'occhio umano*

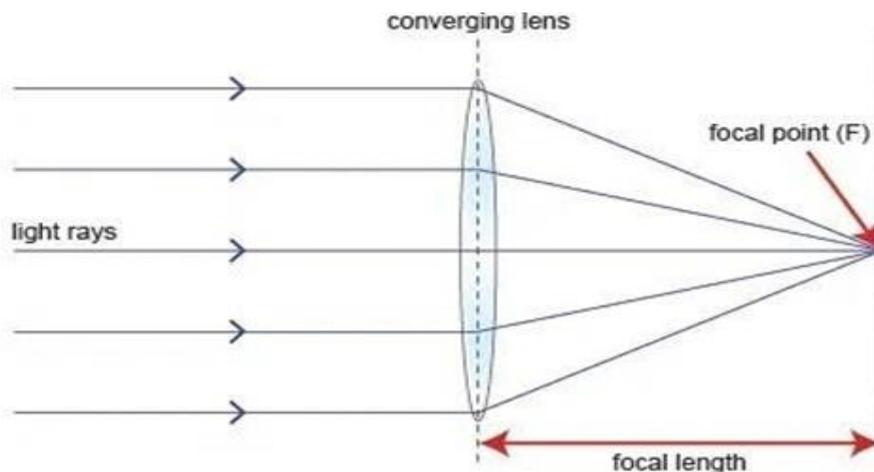
Altra invenzione tanto affascinante quanto avvincente, che si sta cercando di raggiungere da oltre un decennio e che rientra sempre nella categoria *cloaking device*, riguarda la creazione di un cosiddetto “mantello dell’invisibilità”. Questo sottilissimo oggetto in 2D di 80 nm di spessore flessibile sarebbe capace di rendere invisibili anche oggetti di forma irregolare essendo costituito da placche rettangolari d’oro, definite anche nanoantenne, che possono cambiare la direzione dei raggi di luce che le colpiscono. In generale, quando la luce colpisce un oggetto essa viene distorta e riflessa in tutte le direzioni ed è questo che ci consente di vederlo, mentre le nanoantenne permettono di riflettere in linea retta tutti i raggi di luce che colpiscono il mantello rendendo in questo modo invisibile l’oggetto che si cela al di sotto dello stesso agli occhi di un osservatore. Dopo questi prototipi risalenti ad oltre un decennio fa, la ricerca si è affinata e sono stati realizzati metamateriali sempre più sofisticati. I ricercatori difatti hanno teorizzato dei dispositivi di occultamento costituiti da gusci sottili di metamateriali in grado di curvare la radiazione elettromagnetica intorno ad una cavità centrale in cui può essere così celato un oggetto, per esagerare, anche delle dimensioni di un’astronave tanto che un telescopio spaziale puntato su tale guscio osserverebbe solo la galassia circostante (figura 1.10).



*Figura 1.10: Esempio di occultamento su larga scala di una stazione spaziale*

### 1.1.4.2 Applicazioni Ottiche

Un'ulteriore applicazione dei metamateriali riguarda i fenomeni ottici. Un esempio sono le lenti convergenti, le quali sono più spesse al centro che ai bordi affinché le immagini risultino più nitide. Le lenti convenzionali esplicano la loro funzione in base alle loro specifiche forme curve perché le onde luminose incidenti devono rallentare nella parte centrale dove lo spessore è maggiore rispetto a quello dei bordi.



*Figura 1.11: Esempio di lente convergente*

Esempi di lenti convergenti, il cui funzionamento è schematizzato in figura 1.11, sono le lenti di ingrandimento, le lenti delle macchine fotografiche, le lenti degli occhiali per i miopi, tutte composte

da materiali che devono avere certe caratteristiche date le particolari geometrie. L'esigenza di ridurre i costi associati a ciò ha spinto i ricercatori a prendere in considerazione i metamateriali per la costruzione di dispositivi ottici, immaginando di poter costruire delle lenti che hanno una forma molto più semplice e che presentano proprietà differenti al centro rispetto ai bordi proprio per ottenere lo stesso comportamento delle lenti tradizionali. L'idea di base è quella di poter controllare le onde luminose "regolando" le proprietà del materiale in maniera del tutto arbitraria.

Un'onda è caratterizzata da una coppia di proprietà fondamentali:

- Ampiezza, ovvero la distanza tra la cresta e il ventre;
- Lunghezza d'onda, ovvero la distanza tra due creste adiacenti;

Queste sono rappresentate graficamente in figura 1.12.

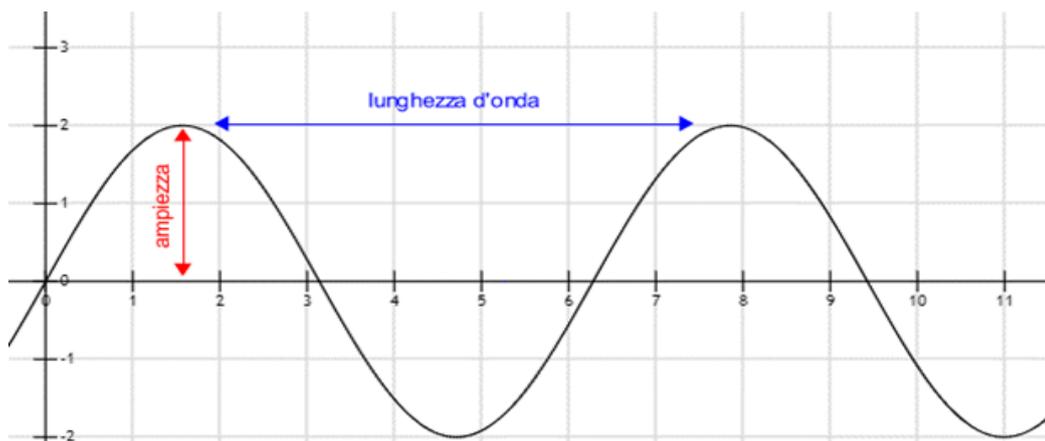


Figura 1.12: Rappresentazione grafica delle proprietà fondamentali di un'onda

La seconda proprietà costituisce la chiave di volta per il dimensionamento e la progettazione di metamateriali aventi la caratteristica di avere una dimensione molto minore rispetto alle lunghezze d'onda della radiazione incidente. Di conseguenza si è cercato di creare una particolare disposizione del materiale a griglia che, contrariamente a quanto accadrebbe se fosse realizzato con materiali tradizionali, permetterebbe di attribuire a ciascuna area del materiale particolari proprietà, consentendo di ottenere delle lenti piatte dove l'onda viaggia lentamente attraverso il centro della struttura e più rapidamente ai bordi. L'aspetto interessante da osservare è che l'utilizzo dei metamateriali permetterebbe di creare un'onda in uscita che abbia un fronte d'onda arbitrariamente predeterminato, ottenendo in tal modo un materiale con prestazioni molto più elevate.

### 1.1.4.3 Applicazioni Antisismiche

Negli ultimi anni, uscendo dall'ambito dell'elettromagnetismo, gli scienziati stanno svolgendo anche altre ricerche, utilizzando questi materiali di ultima generazione per migliorare la difesa dei nostri edifici nei confronti delle azioni sismiche. In due articoli del 2016 e del 2023 <sup>[21,22]</sup> alcuni ricercatori spiegano che i metamateriali possono essere utilizzati per realizzare una barriera intorno agli edifici in modo da riflettere e reindirizzare le onde sismiche difendendo così i fabbricati. Quelle che vengono definite “meta-barriere” verrebbero realizzate costruendo strutture risonanti costituite da masse cilindriche infisse nel terreno creando un sistema innovativo in grado di filtrare oltre il 60% delle onde sismiche o frequenze dannose per le strutture degli edifici. La tecnica costruttiva studiata si applica alle nuove costruzioni ma i ricercatori stanno approfondendo i loro studi cercando tecnologie analoghe per adeguare sismicamente quelle esistenti. I grafici dei risultati ottenuti sono riportati in figura 1.13.

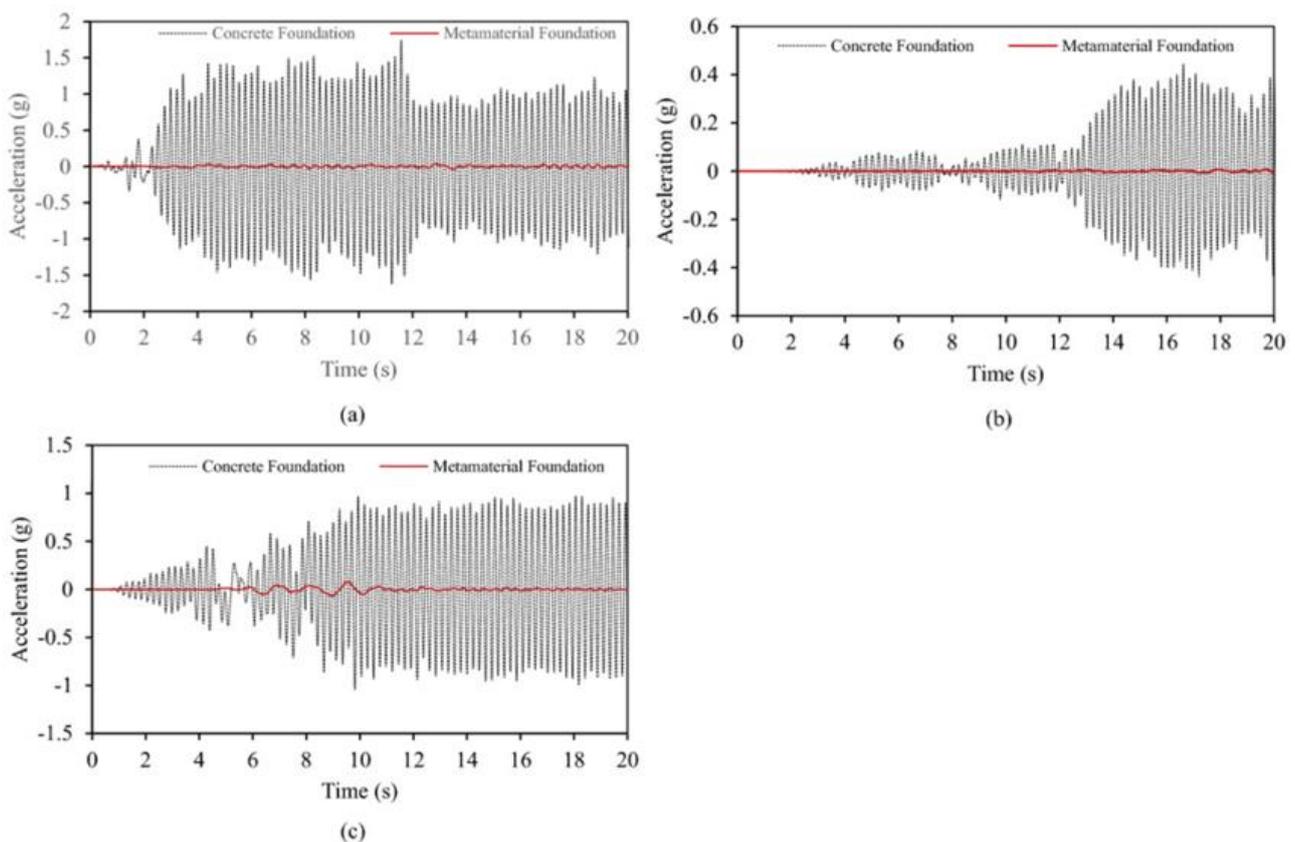
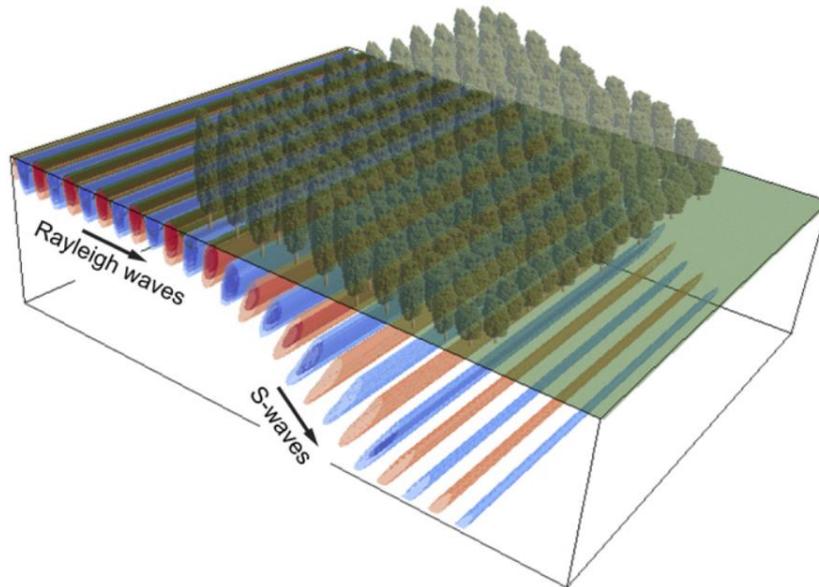


Figura 1.13: Grafici di confronto tra le risposte in termini di accelerazione orizzontale di un punto di una struttura in acciaio posta su fondamenta in metamateriale e in calcestruzzo sottoposte al terremoto di Imperial Valley (a), al terremoto di Kobe (b) e al terremoto di Kern County (c).

Recentemente due ricercatori indiani hanno presentato uno studio relativo alla possibilità di applicare i metamateriali a difesa di un'intera città ispirati da precedenti studi in cui è stato osservato come gruppi di alberi potrebbero essere utilizzati come metamateriali naturali per mitigare il potenziale dannoso delle onde sismiche. Questo effetto di schermatura è illustrato in figura 1.14. La conclusione di queste ricerche indica che le altezze degli edifici dovrebbero diminuire radialmente dall'esterno all'interno della città perché in tal modo si ridurrebbe in modo significativo il danno alle strutture.



*Figura 1.14: Effetto naturale della schermatura degli alberi sulla propagazione delle onde sismiche*

I metamateriali trovano applicazione anche nel campo medico. Grazie alle loro caratteristiche potrebbero essere utilizzati per creare strutture in grado di far ruotare le onde sonore al proprio interno consentendo di deviare le onde elettromagnetiche e rendendo possibile compiere un grande salto in avanti per quanto riguarda strumenti medici che utilizzano gli ultrasuoni, come gli ecografi.

## **1.2 METASUPERFICI**

Come descritto nel capitolo precedente, solo attraverso l'uso di materiali artificiali si ha la possibilità di controllare tutte le proprietà elettromagnetiche del materiale in questione. Le proprietà uniche dei metamateriali hanno consentito l'applicazione di questi ultimi in svariati campi in cui spesso però il loro utilizzo con volumi importanti potrebbe risultare scomodo, soprattutto con l'avanzare delle nuove tecnologie. Fortunatamente, vi è la possibilità di progettare metamateriali non massicci, ottenendo comunque risposte analoghe attraverso l'utilizzo di una sottile controparte elettrica rappresentante un singolo strato sottile, chiamato meta-superficie. Questo risultato può essere

spiegato attraverso il principio di Huygens e la sua generalizzazione. Prima di procedere è necessario anche dire che il loro utilizzo con volumi molto piccoli potrebbe risultare altrettanto critico.

### **1.2.1 Principio di Huygens**

Si consideri un volume  $V$ , dove all'interno si trovano sorgenti di campi elettromagnetici, cariche elettriche  $q_i$  e correnti  $J_i$ . Queste sorgenti creano un campo elettrico  $E$  ed un'induzione magnetica  $B$  all'esterno del volume. In accordo con il principio di Huygens, questo sistema di diffusione può essere sostituito con uno strato sottile di correnti elettriche  $J_{eV}$  e magnetiche  $J_{mV}$ , le quali circondano il volume  $V$ . Quindi, in accordo con tale principio, vi è la possibilità di sostituire un metamateriale voluminoso, attraverso l'induzione di correnti di superficie equivalenti e cariche di polarizzazione, che darebbero lo stesso campo elettrico e magnetico all'esterno del volume.

### **1.2.2 Caratteristiche Generali**

Negli ultimi decenni, molti gruppi scientifici hanno investigato sulle possibilità che potevano offrire le superfici intelligenti, dalle semplici migliorie delle prestazioni di dispositivi e/o componenti elettromagnetici alla concezione di nuove classi di performance come ad esempio accessibilità, riconfigurabilità e consapevolezza.

Nello specifico una metasuperficie è tipicamente modellata come una struttura bidimensionale composta da materiali artificiali, caratterizzata da una grandezza trasversale molto più grande della lunghezza d'onda del segnale elettromagnetico incidente e da uno spessore molto più piccolo della stessa. Le metasuperfici sono costituite da strati di materiali compositi realizzati da patches metalliche o dielettriche, stampate su un substrato dielettrico, ed ogni patch può essere modellata come uno scatter passivo e viene solitamente chiamata unit cell o scattering particle. La scelta opportuna del materiale e delle dimensioni delle unit cell, nonché delle distanze che intercorrono tra esse, permette di ottenere una determinata risposta macroscopica della metasuperficie ad un'onda incidente. Per riportare un esempio strutturale della tecnologia (le cui caratteristiche non sono necessariamente comuni a tutti gli esemplari), è mostrata in figura 1.15 una metasuperficie composta da unit cells disposte secondo uno schema periodico e non uniforme. Il blocco di unit cells che si ripete nello spazio viene detto super cell e quelle che ne costituiscono una sono in generale diverse in forma e dimensione tra loro e vengono progettate per realizzare una specifica funzione.

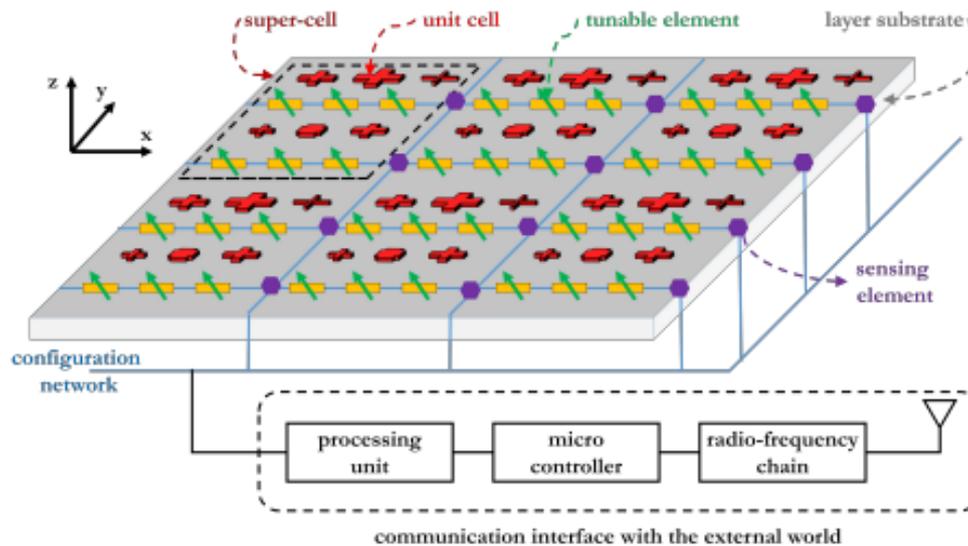


Figura 1.15: Struttura concettuale di una Reconfigurable Intelligent Surface (RIS), famiglia di metasuperfici riconfigurabili dotate di elementi regolabili e sensori. <sup>[25]</sup>

Per definizione una metasuperficie ha le seguenti proprietà:

- **Elettricamente sottile** (electrically thin): il suo spessore è molto minore della lunghezza d'onda. Questa caratteristica permette di ignorare la propagazione e gli effetti di risonanza lungo la direzione normale alla superficie durante i processi di sintesi e analisi di quest'ultima. Di conseguenza il campo presente in un lato della superficie dipenderà unicamente da quello presente nell'altro e dalle sue caratteristiche, permettendo di considerarla come un piano di discontinuità.
- **Elettricamente largo** (electrically large): la sua dimensione trasversale è grande se comparata alla lunghezza d'onda.
- **Omogeneizzabile** (homogenizable): la distanza tra unit cells vicine è molto minore della lunghezza d'onda. Ciò permette di considerare la metasuperficie come omogenea e di descriverla utilizzando funzioni tensoriali continue, più semplici da maneggiare se comparate alla sua reale struttura fisica.
- **Ha una struttura con dimensioni minori della lunghezza d'onda** (Subwavelength structure): le dimensioni della singola unit cell sono molto minori della lunghezza d'onda. Ne consegue che sia possibile assumere che l'onda elettromagnetica incidente non vari significativamente lungo la singola unit cell.

### 1.2.3 Classificazione

L'esigenza di realizzare film sottili che si vadano a sostituire all'intero metamateriale svolgendo la medesima funzione è recente. Inoltre, così come detto per quest'ultimi, il termine metasuperficie non identifica univocamente né un unico tipo di funzione realizzata né un'unica tipologia di superficie. Osservando però quelle introdotte nel corso degli anni risulta possibile tracciare una linea temporale dello sviluppo di queste tecnologie effettuandone una classificazione e potendo dire, in linea di principio, che ogni dieci anni una nuova generazione di metasuperfici si afferma, con rendimenti migliori rispetto a quella precedente. Fino ad oggi, distinguiamo tre generazioni <sup>[26]</sup>: quelle non configurabili, quelle configurabili, quelle configurabili e tempo-varianti.

- **Prima generazione:** metasuperfici progettate e realizzate in modo da implementare una determinata funzione, la quale è immutabile e non può essere variata in un secondo momento. Queste riguardano dispositivi generalmente applicati ai sistemi antenna (materiali ricoprenti, lenti, filtri spaziali, superfici ad alta impedenza, conduttori magnetici, etc.) e sono caratterizzate da strutture periodiche omogenee e regolari.
- **Seconda generazione:** metasuperfici che presentano nella loro struttura dei materiali o dei componenti le cui proprietà elettromagnetiche possono essere modificate applicando uno stimolo esterno. Affinché si possa avere controllo locale e configurabilità della metasuperficie è necessario che un elemento controllabile sia incluso in ogni unit cell. Generalmente vengono incorporati nella struttura diodi p-i-n e diodi varactor p-n che permettono di modificare l'impedenza locale della metasuperficie mediante dei segnali di controllo DC. I dispositivi di questa generazione sono caratterizzati da strutture non omogenee, con proprietà che dipendono dalla modellizzazione spaziale delle superfici.
- **Terza generazione:** metasuperfici caratterizzate da elementi che vengono controllati rapidamente nel tempo, comportando che anche le caratteristiche della metasuperficie stessa varino con essi. La natura tempo-variante di questa classe permette di ottenere nuove funzionalità, tra cui conversione di frequenza, beam steering e focalizzazione. I dispositivi di questa generazione presentano strutture sia omogenee che non omogenee.

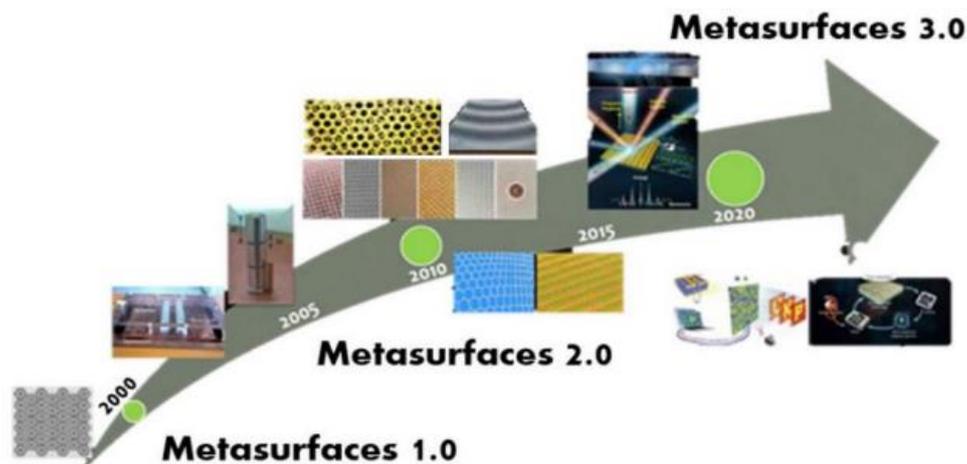


Figura 1.16: Linea del tempo dello sviluppo delle superfici intelligenti.

### 1.2.4 Stato dell'Arte

Di seguito saranno presentati alcuni esempi di metasuperfici e relative applicazioni sviluppate fino ad ora.

Queste trovano spazio in vari settori, da quello militare a quello delle comunicazioni; la loro capacità di manipolare le onde elettromagnetiche, congiuntamente con il loro basso ingombro, le rende un ottimo candidato per realizzare dei rivestimenti capaci di confondere i radar nemici. In particolare, è possibile sia riflettere l'onda incidente modificandone la frequenza e realizzando un effetto doppler artificiale <sup>[27, 28, 29]</sup>, sia spargerne lo spettro su una banda maggiore, rendendo difficile l'identificazione dell'oggetto <sup>[30]</sup>. Un esempio lo si trova in un articolo <sup>[30]</sup> dove viene presentato un sistema di mimetizzazione radar che, sfruttando le proprietà elettromagnetiche delle metasuperfici tempo-varianti, permette di rendere un oggetto invisibile ai radar nemici e visibile a quelli amici.

Così come visto per i metamateriali, esistono anche le metasuperfici di occultamento. Esse sono un gruppo esistente di superfici intelligenti, utilizzate per ricoprire un oggetto "obiettivo", con il fine ultimo di rendere l'oggetto rivestito in questione invisibile ad un'onda elettromagnetica incidente su di esso <sup>[31]</sup>.

Altro campo, forse il più importante, in cui le metasuperfici trovano e troveranno ampio spazio è quello delle comunicazioni. Queste rappresentano una tecnologia candidata a realizzare il paradigma delle comunicazioni olografiche <sup>[32-37]</sup> e sono state utilizzate anche per disturbare le comunicazioni radio. Quest'ultima applicazione si trova in un articolo <sup>[38]</sup> dove viene proposto l'utilizzo di una Frequency Selective Surface (FSS) per impedire le comunicazioni verso l'esterno o l'interno di un edificio, rendendolo un Secure Electromagnetic Building (SEB). Le FSS sono una classe di

metasuperfici che, formate da elementi dielettrici e metallici che si ripetono periodicamente sulla superficie, presentano proprietà di trasmissione e riflessione dipendenti dalla frequenza. Le applicazioni pensate per riguardano edifici quali prigioni, ambasciate ed ospedali.

Altri due esempi interessanti, riguardanti sempre il settore delle comunicazioni, si possono trovare in due articoli del 2019 <sup>[28]</sup> e del 2016 <sup>[39]</sup>. Nel primo viene studiata una metasuperficie tempo variante capace di manipolare la frequenza del campo incidente, caratteristica sfruttata per effettuare un effetto Doppler artificiale. Nel secondo viene introdotta una particolare metasuperficie detta metamirror che, per costruzione, risulta trasparente per qualunque frequenza al di fuori della banda in cui opera rendendola indicata per realizzare antenne per i satelliti o da incorporare nei muri degli edifici.

Un altro esempio, molto particolare ma sempre legato al mondo della comunicazione, viene mostrato in una pubblicazione <sup>[40]</sup> dove si analizza una nuova architettura per le comunicazioni wireless che sfrutta le digital coding metasurfaces, una famiglia di metasuperfici che, essendo composte da elementi che possono assumere solo i due stati ‘0’ e ‘1’ (corrispondenti a coefficienti di riflessione con fase opposta e ugual ampiezza), possono essere intese come le versioni digitali delle metasuperfici configurabili tradizionali.

Procedendo nello sviluppo di nuove tecnologie e aumentando la dimensione e la velocità degli oggetti con cui le metasuperfici lavoreranno, così come la complessità dell’impiego, esse dovrebbero seguire lo stesso andamento nell’aumento dei gradi di libertà, delle caratteristiche di riconfigurabilità e capacità cognitive <sup>[26]</sup> come si vede in figura 1.17.

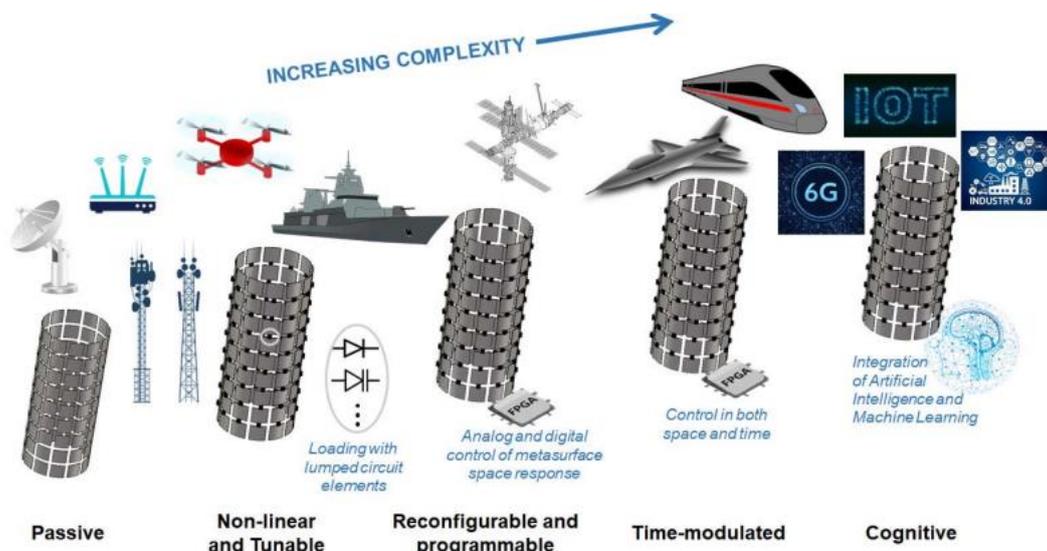


Figura 1.17: Rappresentazione schematica della crescente complessità delle metasuperfici per diversi scenari applicativi.

Risulta evidente come la capacità di agire sulle caratteristiche della superficie intelligente sia nello spazio che nel tempo (quindi la loro riconfigurabilità), aumenti le possibilità di creare dispositivi elettromagnetici unici, che posseggono proprietà di riconfigurabilità, modellabilità temporale e di programmabilità delle risposte. La realizzazione di tali materiali ha esteso l'impiego di queste nuove conoscenze dai semplici casi di studio generali ai complessi scenari del mondo moderno permettendoci di controllare moltissimi aspetti di vari settori che prima sembrava impossibile anche solo immaginare. Alla luce di tali considerazioni si inserisce proprio il progetto PULSE, che di seguito verrà presentato più nel dettaglio.

## **2.PULSE**

Finora l'ambiente è stato considerato come una fonte di fading, disordine e blocco, con conseguenze negative per l'efficienza e la robustezza dei sistemi di comunicazione. Tuttavia, l'intensa ricerca sviluppata verso le comunicazioni oltre il 5G sta portando a un cambiamento di paradigma, in cui l'ambiente viene sfruttato come un nuovo grado di libertà e gioca un ruolo attivo nel raggiungere prestazioni di sistema senza precedenti. Per l'implementazione di questo impegnativo scopo, l'uso di superfici intelligenti in grado di controllare la propagazione delle onde elettromagnetiche è stato recentemente proposto e la loro introduzione nel campo delle comunicazioni potrebbe comportare un importante cambiamento. Infatti, l'ambiente passerebbe dall'essere un dato noto del problema, immutabile e che può essere solo compensato, ad essere una variabile soggetta a ottimizzazione grazie alle capacità delle metasuperfici di manipolare il campo elettromagnetico tramite strutture a basso costo, leggere e planari.

### **2.1 OBIETTIVI DEL PROGETTO**

L'ampia proliferazione dei sistemi senza fili, l'emergere di nuove ed entusiasmanti tecnologie e sistemi di comunicazione come 5G ed oltre stanno rapidamente sia offrendo nuove opportunità economiche e apportando benefici alla società sia proponendo nuove ed impegnative sfide. Questi sistemi di nuova generazione, infatti, hanno requisiti di funzionamento stringenti che introducono un ulteriore impegno in fase di progettazione per rendere questi sistemi wireless capaci di interagire in ambienti sempre più complessi. Altro scopo è ottenere un sistema tanto robusto quanto sicuro e che sia meno soggetto a quei fenomeni che provocano una degradazione del segnale quali riflessione, rifrazione, diffrazione e assorbimento. In questo contesto, la riconfigurabilità e.m. rappresenta una tecnologia fondamentale, in quanto consente di modificare in tempo reale le funzionalità e la natura di un dispositivo, consentendo di utilizzarlo per scopi diversi ed al variare delle condizioni. Purtroppo, gli strumenti che consentono la riconfigurabilità al giorno d'oggi non sono adatti alla prossima generazione di sistemi, in quanto affetti da gravi limitazioni intrinseche in termini di frequenza massima di funzionamento, velocità e profondità di sintonizzazione e complessità di integrazione. In questo progetto si propone il superamento di questi limiti definendo uno scenario radicalmente nuovo, basato sulle affascinanti scoperte della fisica del plasma.

Alla luce di ciò, PULSE persegue l'ambizioso obiettivo di definire un nuovo orizzonte tecnologico per l'implementazione di dispositivi elettromagnetici riconfigurabili unificando i domini di ricerca delle metasuperfici (MTS) con la fisica del plasma. L'idea fondamentale è quella di sviluppare

metadispositivi metallici e dielettrici integrati con sorgenti plasma creando una piattaforma tecnologica radicalmente nuova, con un incredibile potenziale in termini di impatto sulla nostra società. Questo effetto positivo riguarderebbe in particolare i mercati delle telecomunicazioni di prossima generazione gettando le basi per dispositivi in cui la forma di questi diventa un ulteriore grado di libertà per ottenere nuovi fondamentali effetti.

In particolare, PULSE si propone di esplorare le seguenti linee di ricerca tecnologiche: plasma come materiale ospite (plasma as host material) e plasma come meta-atomi o parte di essi (plasma as meta-atoms or part of them).

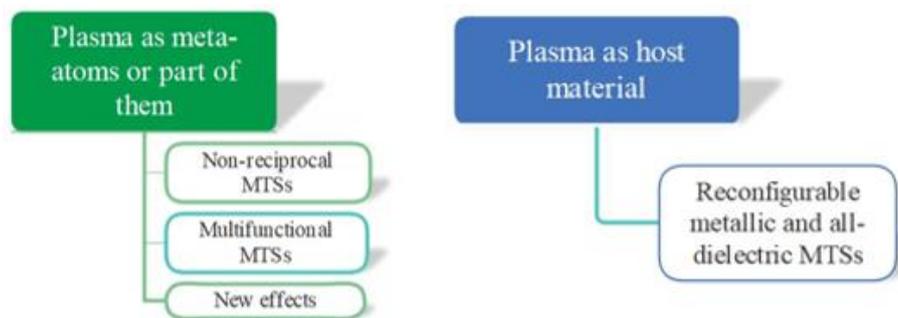


Figura 2.1: Schematico delle tecnologie esplorate dal progetto

## 2.2 PLASMA AS HOST MATERIAL

In questo tipo di impostazione il plasma può essere utilizzato come un ambiente di riconfigurazione per metasuperfici elettromagnetiche. In questo scenario, la modifica delle proprietà elettromagnetiche del materiale ospite consente di riconfigurare il comportamento di una metasuperficie metallica in modo più rapido e semplice rispetto agli approcci convenzionali. Questo tipo di struttura permette un pieno controllo della riflessione e della trasmissione con bassissime perdite anche nell'intervallo delle onde millimetriche e, inoltre, ha un'interferenza limitata su altri sistemi di comunicazione presenti vicino ad esso.

Un esempio di questo tipo di soluzione lo si trova in un articolo del 2019 pubblicato su *Scientific Reports* <sup>[41]</sup> in cui viene presentato uno studio sulla propagazione delle onde attraverso un metamateriale con indice di rifrazione negativo, o left-handed material, immerso in un plasma gassoso. Il soggetto analizzato è costituito da un array 3D di risonatori ad anello avvolto da un plasma di argon riscaldato induttivamente con una frequenza nominale di 2,65GHz. Gli spettri di trasmissione mostrano che le onde elettromagnetiche attraversano il mezzo composito da 1,3-1,7GHz, valori per il quale la permeabilità degli anelli e la permittività del plasma sono contemporaneamente negative, mentre al di fuori di questa banda di frequenza si osservano solo le onde di superficie ed evanescenza.

Altra caratteristica osservata è la densità di elettroni liberi del plasma che risulta accoppiata al riscaldamento induttivo, consentendo la riconfigurazione dinamica della banda di frequenza e dell'impedenza d'onda del metamateriale. Di seguito è riportato uno schematico del set-up utilizzato nell'articolo.

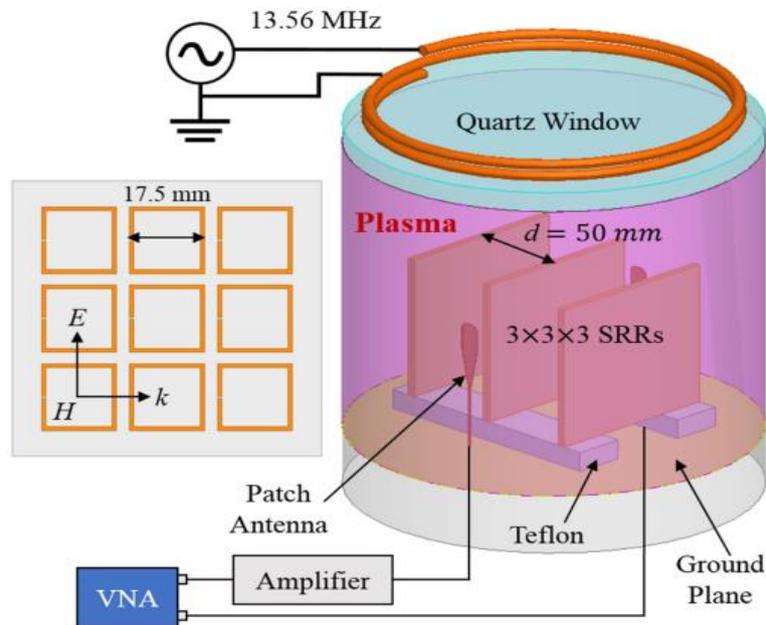


Figura 2.2: Configurazione sperimentale che mostra i risonatori ad anello diviso (SRR) all'interno del volume di plasma.

## 2.3 PLASMA AS META-ATOMS OR PART OF THEM

In questa configurazione il plasma può sostituire i componenti metallici e dielettrici tipicamente utilizzati come materiale costitutivo dei meta-atomi. In questo modo si va incontro ai seguenti scenari:

1. La metasuperficie può essere modulata nello spazio attivando solo alcuni meta-atomi specifici ed il modello spaziale della metasuperficie può essere anche aggiornato dinamicamente nel tempo. Dispositivi multifunzionali, in grado di passare attraverso funzionalità elettromagnetiche diverse come beam-steering, assorbimento completo, isolamento, ecc., possono essere progettati utilizzando questo approccio.
2. Le proprietà individuali di ciascun meta-atomo possono essere continuamente modulate nel tempo con una funzione appropriata. Possono essere implementati effetti quali accumulo di energia, isolamento e il multiplexing di frequenza.
3. In quest'ultimo punto il plasma rende possibile uno scenario concettualmente nuovo in cui sia la dimensione che la forma di un meta-atomo sono modulati nel tempo durante la loro

interazione con il campo elettromagnetico. Questo porta speranza per la scoperta di nuovi effetti.

Alcuni esempi per questo tipo di soluzione si possono trovare in due articoli, uno del 2012 ed uno del 2017: il primo <sup>[42]</sup> introduce al mondo dei microplasma, ovvero delle sorgenti plasma in cui, per definizione, la distanza interelettrodica risulta essere sub-millimetrica. Nell'articolo vengono esplorate varie configurazioni (figura 2.3) dato che questi hanno attirato una notevole attenzione per via della loro appetibilità in vari ambiti come i processi di microfabbricazione, la sintesi di particelle su scala nanometrica e trattamenti biomedici, ma la loro applicazione ai metamateriali è un obiettivo di ricerca tanto variegato quanto promettente. Altro punto fondamentale è stato il fatto che si è capito che l'interazione tra le onde elettromagnetiche ed i microplasma è utile per la diagnostica dei parametri interni dei plasma stessi; infatti, i segnali delle onde trasmesse o disperse dai microplasma includono importanti informazioni sulla densità elettronica ( $n_e$ ) <sup>[43-45]</sup>, e tali studi possono rafforzare la comprensione dei plasma nel mondo dei metamateriali <sup>[46,47]</sup>.

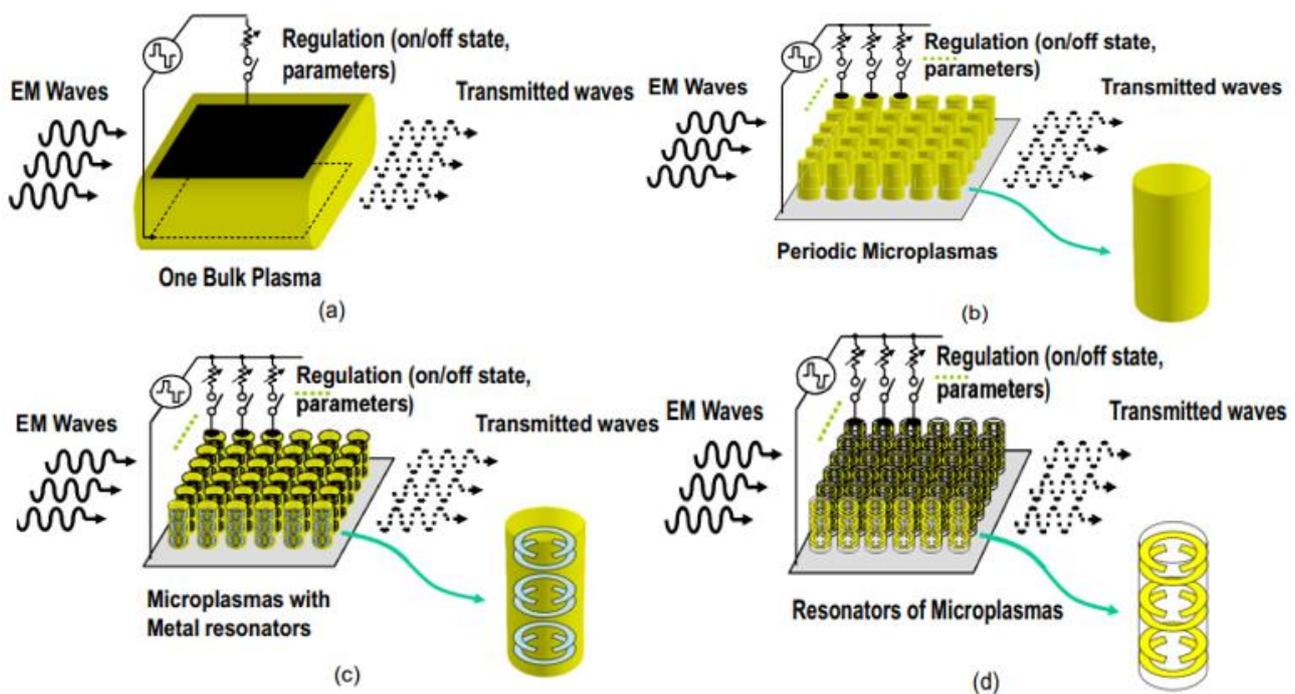


Figura 2.3: Varie configurazioni per i plasma come metamateriali: a) plasma bulk; b) microplasma periodici; c) composti di microplasma e componenti metallici; d) microplasma strutturati.

Nel secondo articolo <sup>[48]</sup>, pubblicato sulla rivista *Plasma Sources Science and Technology*, vengono discussi i risultati di un'indagine computazionale svolta sulle proprietà del plasma in piccoli array di microplasma (MA). Viene infatti presentato un MA come metodo per controllare la propagazione delle onde elettromagnetiche risultando di grande interesse poiché le proprietà elettriche degli stessi

possono essere modificate rapidamente attraverso combinazioni di condizioni operative (ad esempio pressione e miscela di gas), distribuzione spaziale del plasma e forme d'onda delle tensioni applicate. I modelli presi in considerazione (figura 2.4) sono array di microplasma sostenuti in gas rarefatti a pressioni fino a cento Torr in una camera sigillata con singole celle di plasma di circa  $100\ \mu\text{m}$  di grandezza a cui sono applicate forme d'onda di tensione continua pulsata con un'ampiezza di 30 nanosecondi a frequenze di ripetizione fino a dieci MHz.

Un'interessante informazione emersa riguarda l'interferenza tra le celle del plasma, ovvero si nota come anche senza barriere fisiche tra esse, il carattere individuale di ciascuna cella può essere mantenuto. Tuttavia, le celle stesse non sono completamente indipendenti dato che la diffusione di stati atomici metastabili eccitati e di piccoli flussi di ioni ha permesso alle celle adiacenti di operare a tensioni più basse. La capacità di controllare la propagazione delle microonde attraverso le guide d'onda è stata studiata computazionalmente collocando un MA all'interno di una guida d'onda standard ed esaminando i coefficienti di trasmissione risultanti osservando che per frequenze comprese tra dieci e cento GHz, la potenza trasmessa può essere controllata dalla distribuzione spaziale delle celle di MA rispetto alla struttura dell'onda.

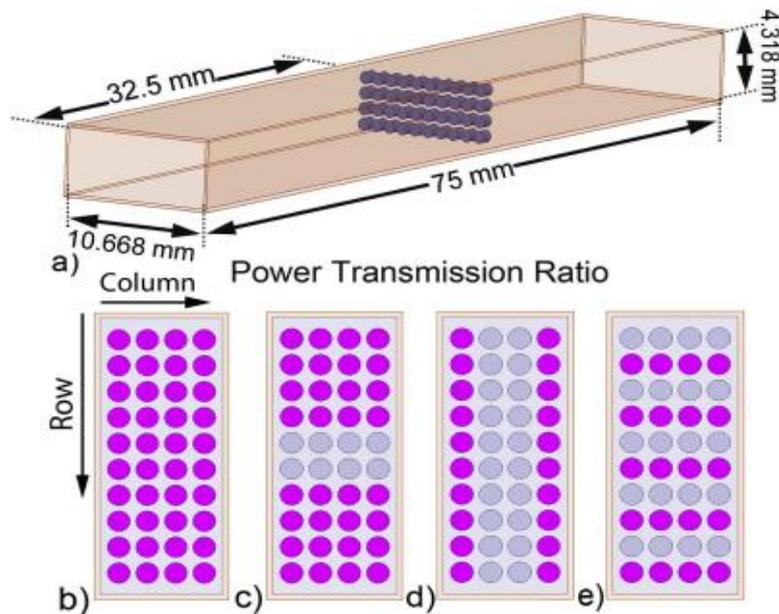


Figura 2.4: Trasmissione attraverso una guida a microonde con incorporato un MA  $4 \times 10$ . (a) Geometria della guida d'onda WR-42 e (b) (c) (d) (e) diversi modelli di MA. Il viola (scuro) indica una cella al plasma, il grigio (chiaro) indica una cella con plasma spento.

I metadispositivi basati sul plasma che si intende sviluppare nell'ambito del progetto PULSE si basano sulle più recenti scoperte in entrambi i campi appena mostrati delle metasuperfici e della fisica

dei plasmi. Tuttavia, l'obiettivo non è solo quello di combinare questi due campi per la progettazione di dispositivi con prestazioni migliorate, ma piuttosto fonderle completamente per stabilire una nuova linea di ricerca.

Lo scopo principale è quello quindi di sfruttare le metasuperfici basate sui plasmi come punto di partenza che permetta di concepire e realizzare dispositivi all'avanguardia con funzionalità inedite.

## **2.4 AREE DI APPLICAZIONE DEL PROGETTO**

I metadispositivi più studiati con relativi approcci, principi di funzionamento ed applicazioni sono mostrati di seguito, con uno sguardo anche alle importanti limitazioni che presentano le tecnologie attuali sfruttate per degli scopi analoghi.

### **2.4.1 Limiti delle tecnologie attuali**

Gli attuali paradigmi tecnologici sfruttati per raggiungere la riconfigurabilità elettromagnetica riguardano tre diversi tipi di approcci: elettronica, geometrica e materiale. Questi presentano alcune limitazioni che verranno mostrate assieme al principio di funzionamento.

- **Ottimizzazione elettronica:** questo approccio prevede l'integrazione di elementi elettronici, controllati attraverso una rete esterna, all'interno della cella elementare della struttura composita. Alcuni esempi di questa tecnologia possono essere diodi, transistor e sistemi micro-elettromeccanici a radiofrequenza (MEMS). Una delle limitazioni più rilevanti è dovuta ai semiconduttori che compongono questa soluzione tecnologica che risultano essere efficaci solo nel regime di bassa frequenza ( $<10$  GHz) a causa degli effetti parassiti, oltre ad avere dei requisiti di fabbricazione di un certo tipo e dei costi unitari elevati.
- **Ottimizzazione geometrica:** questo secondo approccio prevede l'uso di tecniche che alternano la posizione degli elementi conduttori. Alcuni esempi si trovano in sistemi per la manipolazione di meta-atomi o nel mondo della micro-fluidodinamica. I principali limiti li troviamo nell'elevata complessità di implementazione di questa soluzione ed il tasso di ottimizzazione basso.
- **Ottimizzazione materiale:** quest'ultimo approccio riguarda la modifica delle proprietà dell'ambiente in cui sono situati i meta-atomi o le proprietà materiali dei meta-atomi stessi. Esempi rilevanti sono cristalli liquidi, materiali a cambiamento di fase e grafene con una serie di limitazioni riguardanti riconfigurabilità e regolazione dei dispositivi. Ad esempio, i

materiali a cambiamento di fase richiedono complessi meccanismi di riscaldamento/raffreddamento per il corretto funzionamento presentando bassi tassi di ottimizzazione.

Come visto, tutti questi approcci hanno dei limiti fondamentali e, fino ad ora, sono stati implementati solo in scenari molto specifici in cui le condizioni operative permangono in un range limitato intorno a quelle standard. Nel paragrafo successivo verranno mostrate le principali soluzioni tecnologiche esistenti riguardanti il mondo dei metamateriali per superare le condizioni limitanti analizzate.

## **2.4.2 Meta-tecnologie esistenti**

La ricerca scientifica ha aperto la strada a entusiasmanti possibilità di ingegnerizzare la radiazione e la propagazione delle onde elettromagnetiche in modi mai visti prima. Le principali tecnologie riguardano: metasuperfici, metagratings (ovvero superfici con una maggiore periodicità, che mostrano anche effetti di diffrazione <sup>[49]</sup>) e metadispositivi modulati nello spazio-tempo. Le funzionalità cardine comuni risiedono nel controllo completo della riflessione, della trasmissione e dell'assorbimento delle onde e.m. e del modellamento arbitrario dei campi elettromagnetici che si traducono in un'estrema capacità nella manipolazione delle onde. Per quanto riguarda le possibili applicazioni queste soluzioni tecnologiche consentono la creazione di specchi non convenzionali, assorbitori ultra-sottili, riflettori e trasmettitori perfetti, mantelli dell'invisibilità, array di riflessione e di trasmissione perfetti per angoli di deflessione estremi, isolatori senza magneti ed altro.

La visione del progetto riguarda l'area di applicazione di queste tecnologie, ovvero quella delle comunicazioni (ma non solo), con l'introduzione di nuove strade e domini di ricerca di seguito riassunti nello schema.

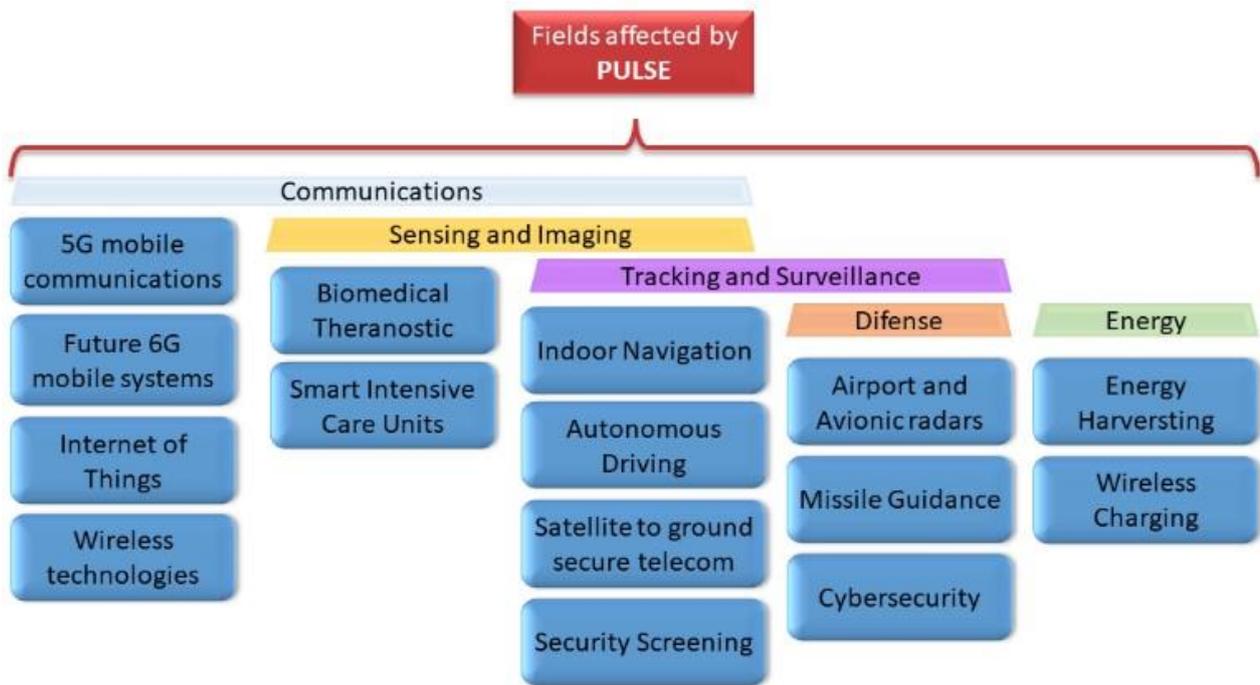


Figura 2.5: Aree interessate dal progetto PULSE

Le scoperte tecnologiche e scientifiche che si faranno riguardanti i vari ambiti mostrati in figura 2.5 rappresenteranno un notevole progresso non solo per l'elettromagnetismo, le comunicazioni e i metamateriali, ma anche per il campo della tecnologia plasma stessa. La ricerca sul suo utilizzo per i sistemi wireless è ancora agli inizi e sono presenti alcuni lavori, definibili pionieristici, che hanno discusso la realizzazione di dispositivi elementari <sup>[50-54]</sup> in cui, tuttavia, il plasma viene impiegato come un semplice materiale a due stati la cui natura conduttiva può essere attivata o disattivata modificando i parametri del gas ionizzato. Tutti questi studi oltretutto si basano sullo sfruttamento di grandi sorgenti che richiedono una potenza di accensione significativa, non conforme ai requisiti di basso consumo energetico dei futuri sistemi wireless. Per questo motivo la riduzione di scala e la piena integrazione della sorgente plasma in superfici riconfigurabili, disomogenee e variabili nel tempo, sulle dimensioni della sub-lunghezza d'onda, rimane un percorso di ricerca tecnologica senza precedenti che PULSE si pone tra gli obiettivi fondamentali.

In sintesi, il procedere del progetto permetterà di sfruttare al massimo le potenzialità delle metasuperfici, portando il controllo delle loro proprietà (nel tempo, nello spazio, nella forma e nella frequenza) ad un livello finora sconosciuto. Allo stesso tempo, le scoperte scientifiche nel campo della tecnologia del plasma saranno ottenute ridimensionando le sorgenti, riducendo drasticamente i loro requisiti di potenza e consentendo loro di esibire una gamma senza precedenti di risposte

elettromagnetiche possibili, piuttosto che passare principalmente da uno stato di riflessione a uno di trasmissione.

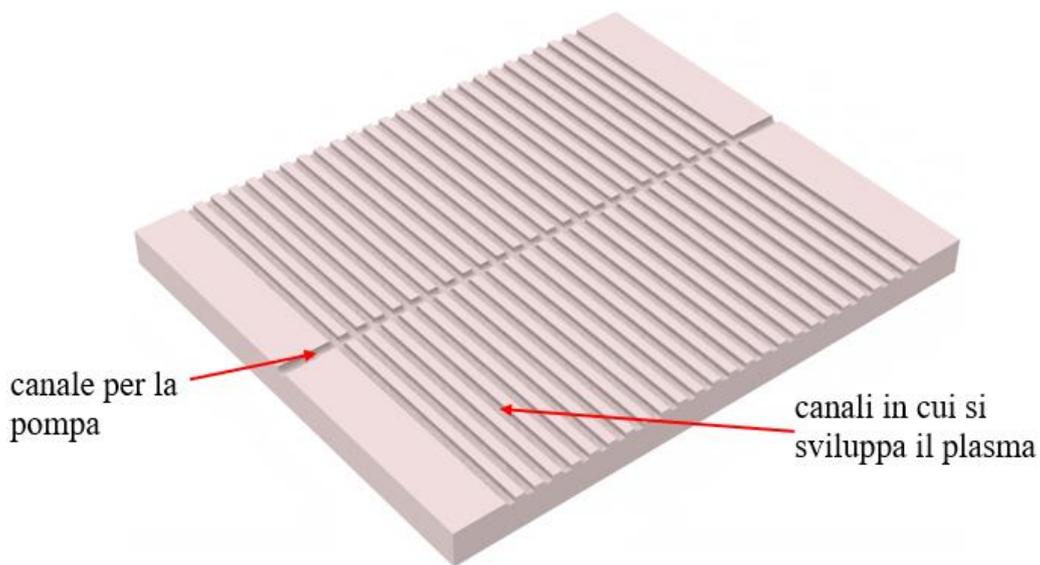
## **2.5 PREMESSE DEL LAVORO DI TESI**

Nel contesto appena analizzato si inserisce il lavoro svolto con il gruppo di applicazioni industriali dei plasmi dell'università di Bologna, in cui ci si è posto come scopo finale la realizzazione di una sorgente di microplasma, decidendo di percorrere la strada del "plasma come meta-atomi o parte di essi". In particolare, si punta allo sviluppo di un sistema in cui la distanza interelettrodica sia di 10 centimetri, che sia in grado di operare a pressioni molto sotto quella atmosferica, scendendo sotto 0,1 mbar e che necessiti di valori di potenza minimi per il funzionamento come emerge dagli obiettivi di PULSE. Essendo la mia esperienza iniziata nelle prime fasi del progetto, mi sono occupato nello specifico della parte prototipale di quest'ultimo.

## 3.MATERIALI E METODI

### 3.1 DESCRIZIONE PROTOTIPI REALIZZATI

L'idea da cui si è partiti puntava alla realizzazione di una sorgente multicanale in materiale plastico (plexiglass), come mostrato in figura 3.1, in cui tramite il canale centrale, attraverso una pompa, si sarebbe ottenuto il duplice effetto di spingersi fino alla pressione voluta e fluire all'interno dei canali Argon, in modo da sviluppare plasma a bassa pressione in tutte le sezioni in parallelo.



*Figura 3.1: Rendering del prototipo pensato*

Si è optato però per partire da prototipi più semplici, interfacciandosi prima con un sistema composto da un solo canale per studiarne il comportamento e svolgere una caratterizzazione elettrica adeguata a questa fase progettuale iniziale.

#### 3.1.1 Prototipo uno

Questa prima sorgente, fabbricata e lavorata al tornio come le successive, mostrata nella figura sottostante, è costituita da un tubo in plexiglass circolare alto 95 mm con un diametro di 25. A metà della struttura è presente un foro di 4 mm di diametro in cui è inserito un raccordo gas per la pompa collegato ad un tubo interno passante dal diametro di 2 mm in cui è prevista la generazione del plasma. Il vuoto ottenuto tramite la pompa è mantenuto da due dischi di alluminio, spessi 7 mm e con un diametro di 22, situati alle estremità del tubo e fissati tramite colla siliconica che fungono oltretutto

da elettrodi per consentire l'accensione del plasma. Questa primissima configurazione realizzata presentava vari limiti: prima di tutto era necessaria, oltre ad un ingresso gas, anche un'uscita per consentire alla pompa di fluire all'interno della sorgente Argon, dato che in questa modalità risultava possibile generare il vuoto lavorando solo con aria. Un'altra problematica riguardava gli elettrodi e l'impossibilità di modulare la distanza tra essi per esplorare diverse distanze interelettrodiche. Infine, sempre gli elettrodi, presentavano il difetto fondamentale di non essere in grado di garantire una tenuta adeguata del prototipo alle basse pressioni a cui ci si è spinti, rendendo necessario pensare ad un altro modo con cui fissarli alla struttura, magari meccanicamente.

Queste serie di limitazioni sono state superate con la seconda soluzione progettuale realizzata presentata nel capitolo che segue.

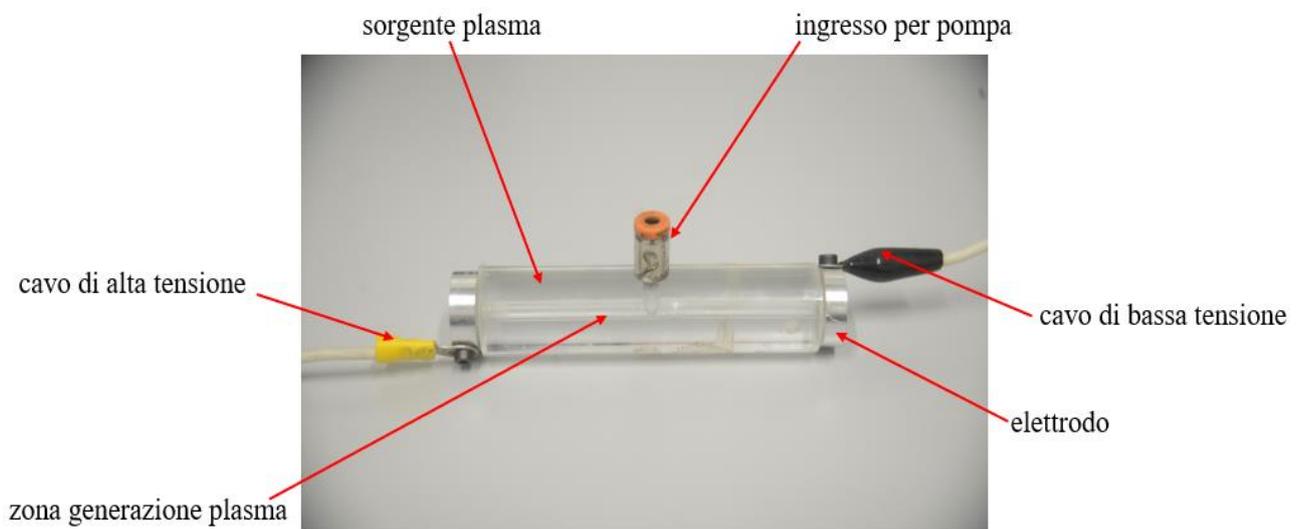


Figura 3.2: Foto della prima sorgente sviluppata

### 3.1.2 Prototipo due

Questa nuova soluzione sviluppata ha risolto le problematiche della precedente apportando delle novità. Si tratta sempre di una sorgente costituita da un tubo in plexiglass, come mostrato in figura 3.3, con una lunghezza però di 102 mm ed un diametro di 25 mm. Nella parte inferiore è presente un foro passante di 2,5 mm di diametro grazie al quale è stato reso possibile il passaggio di Argon nella zona di generazione del plasma. L'altra grande differenza ha riguardato il sistema elettrodi, essi sono stati pensati per essere "modulabili": a seconda della distanza interelettrodica desiderata risulta possibile smontare il porta-elettrodo di alluminio, dal diametro di 25 mm ed uno spessore di 18 mm, presente all'estremità collegata alla terra e rimontarlo con un elettrodo, realizzato in ottone, di lunghezza diversa a seconda dell'esigenza, rendendo il sistema molto più elastico. Infatti, nel corso

delle caratterizzazioni elettriche, in seguito discusse, sono state esplorate più condizioni operative proprio grazie a questa possibilità costruttiva. Altro compito dei porta-elettrodi è quello di garantire la tenuta della sorgente alle basse pressioni, reso possibile meccanicamente dal fatto che in questa nuova configurazione essi si avvitano al prototipo tramite una filettatura presente alle sue estremità consentendo il fissaggio. Questo e la tenuta sono garantite da o-ring, uno per estremità, che impediscono il trafilemento di gas tra i vari componenti della struttura.

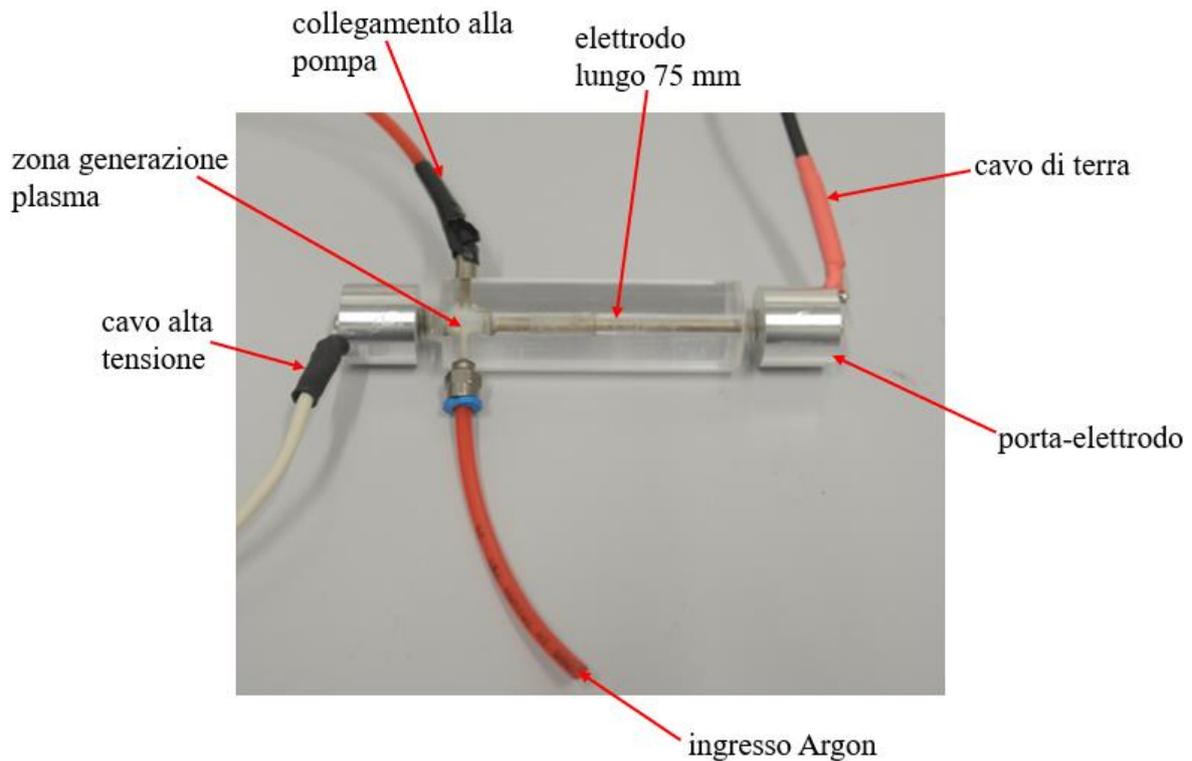


Figura 3.3: Foto della seconda sorgente sviluppata con una distanza interelettrodica di 25 millimetri

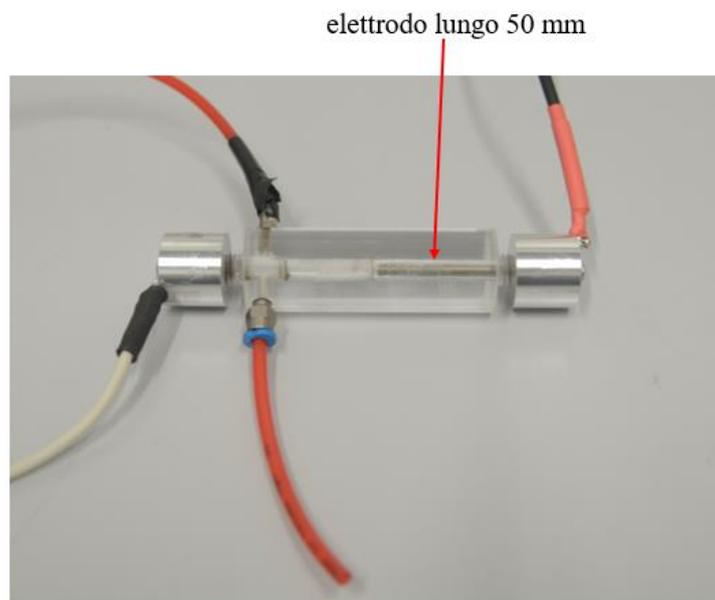
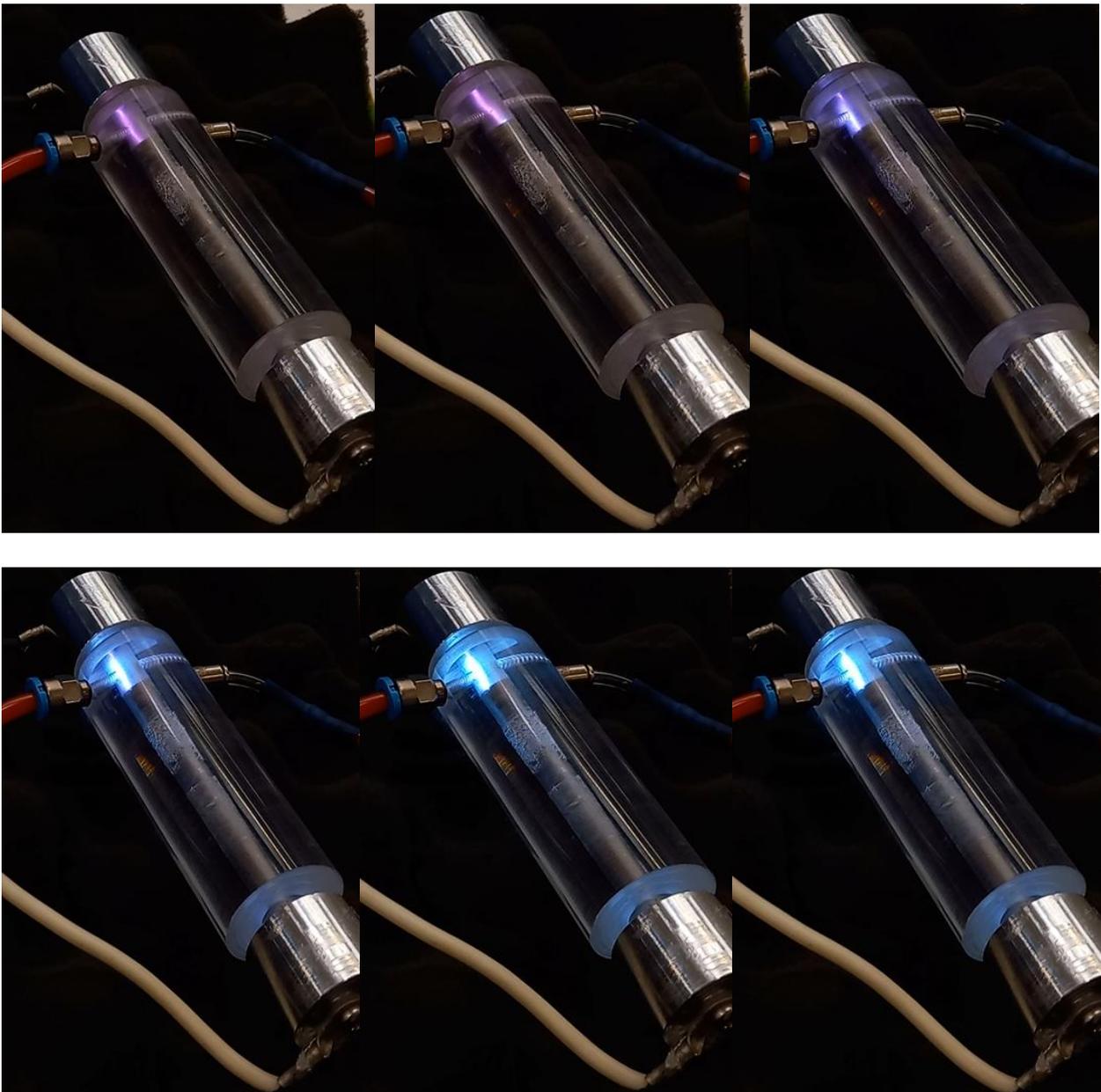


Figura 3.4: Foto della seconda sorgente sviluppata con una distanza interelettrodica di 50 millimetri

Risolte quindi le problematiche della prima sorgente si è proseguito con l'utilizzo di quella appena mostrata, incombendo però in una nuova problematica che ha compromesso irrimediabilmente la sua integrità.

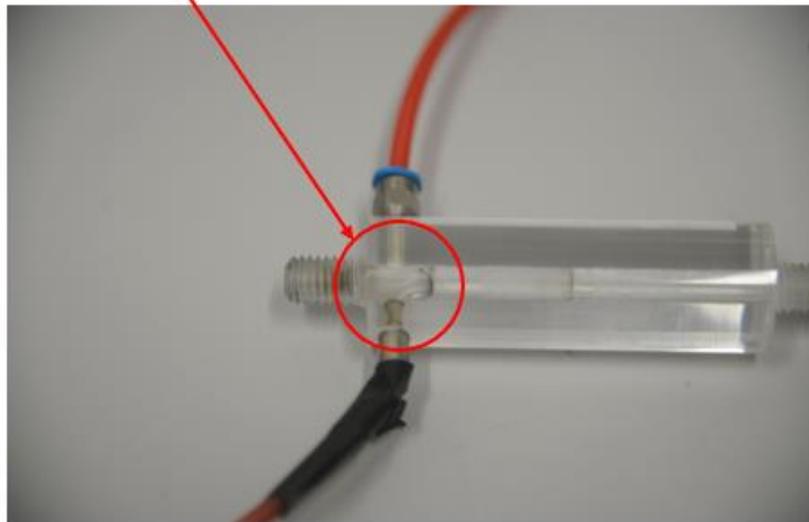
Durante, infatti, le operazioni di caratterizzazione elettrica sono state riscontrate incongruenze nei dati ottenuti anche in test in cui non si facevano variare le condizioni operative osservando una scarica di plasma che con il passare degli utilizzi risultava essere sempre più instabile.



*Figura 3.5: Evoluzione della scarica con transizione ad arco nella seconda sorgente sviluppata*

Come emerge dalla sequenza di foto sopra riportata la scarica dopo pochi secondi dal suo sviluppo transisce ad arco anche a condizioni operative per il quale presentava inizialmente un comportamento stabile, ovvero, come nel caso mostrato, in Argon ad una tensione di 11 kV con una frequenza di 1 kHz ed un gap interelettrodico di 25 mm. Un fenomeno molto plausibile per spiegare ciò risulta essere quella della deformazione della sorgente stessa: il flusso costante di gas che attraversava la zona di generazione della scarica la rendeva instabile deformandola, provocando una fusione del plexiglass, come mostrato in figura 3.6, principalmente dal lato della pompa quando si lavora in aria, mentre dal lato dell'ingresso dell'Argon quando si lavora con quest'ultimo, andando ad inficiare le misurazioni rendendole casuali a seconda di come si genera il plasma.

zona di plexiglass fusa



*Figura 3.6: Foto della sorgente danneggiata*

Un altro motivo da prendere in considerazione riguarda il generatore di tensione utilizzato: in queste misurazioni si è usufruito di un generatore micropulsato (AlmaPULSE) che è in grado di erogare potenze elevate; perciò, potrebbe essere anche stata questa la causa della perdita di integrità da parte della sorgente.

Alla luce di quanto emerso il prototipo è risultato essere irrimediabilmente compromesso ed è stato necessario lo sviluppo di una nuova soluzione che preveda il disaccoppiamento della zona di generazione del plasma da quella di ingresso e flussaggio di Argon al suo interno. Si è proceduto quindi in questa direzione.

### 3.1.3 Generatori

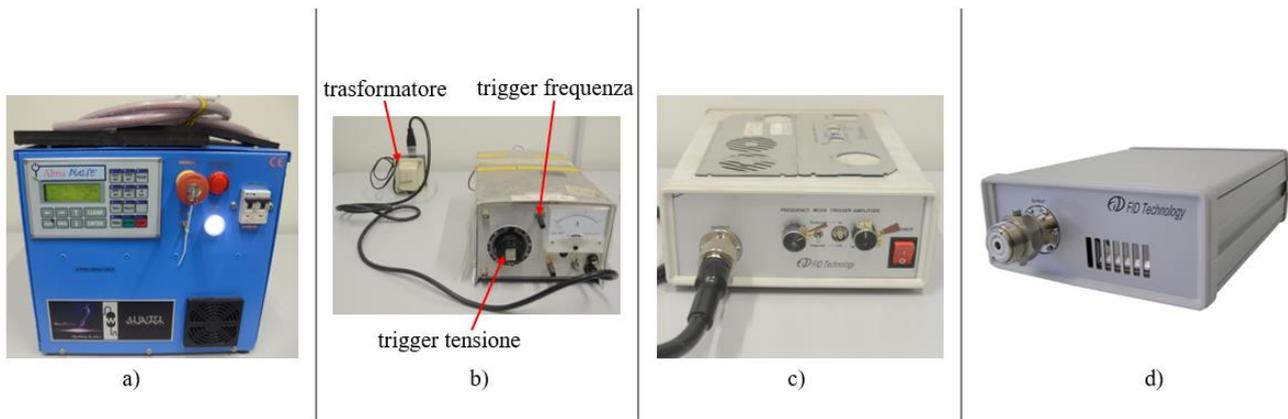
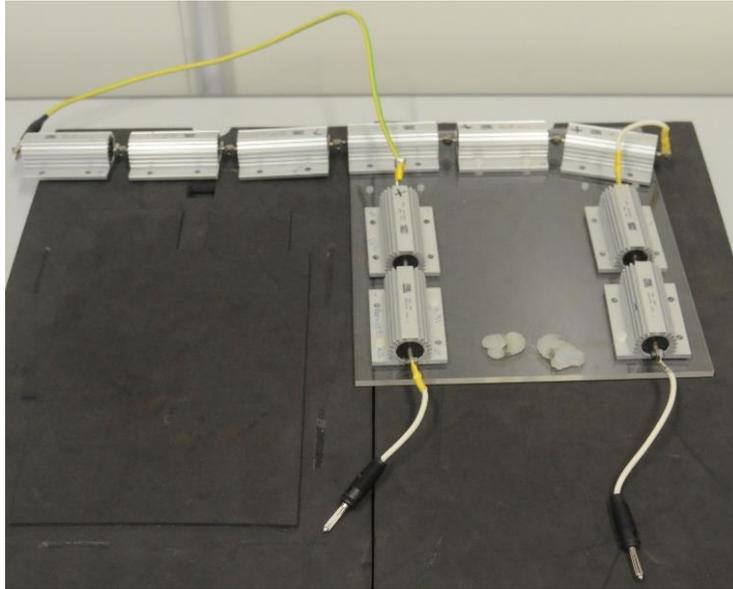


Figura 3.7: Foto dei vari generatori testati

Prima di procedere con la presentazione del terzo prototipo, si è deciso di testare, alla luce dell'ultima osservazione fatta, l'efficacia della sorgente utilizzando generatori di impulsi di natura diversa. Sono state testate le seguenti soluzioni:

- a) AlmaPULSE: un generatore d'alta tensione micropulsato in cui è possibile far variare indipendentemente tra loro tensione e frequenza;
- b) Amazing One: un generatore di tensione sinusoidale, di fattura americana, in cui frequenza e tensione sono linearmente dipendenti;
- c) Nano pulsato: un generatore la cui tensione erogata cresce con un fronte di salita nell'ordine dei nanosecondi;
- d) Pico pulsato: un generatore la cui tensione erogata cresce con un fronte di salita nell'ordine dei picosecondi;

Siccome i generatori nano e pico pulsati hanno generato grandi interferenze con l'oscilloscopio e la strumentazione in generale rendendo impossibile le misurazioni, si è deciso di scartarli. Oltretutto, per evitare le stesse problematiche del prototipo numero due, si è deciso di far funzionare l'AlmaPULSE collegandolo ad un banco di dieci resistenze in serie da 10 kOhm l'una per un totale di 100 kOhm. Facendo ciò è stato possibile ottenere un'attenuazione della corrente in gioco e quindi della potenza per prevenire danni alla sorgente.



*Figura 3.8: Foto del banco di resistenze in serie*

### **3.1.4 Prototipo tre**

Questa soluzione progettuale è stata sviluppata, per ovviare alle problematiche della precedente, come segue: il prototipo, mostrato in figura 3.9, presenta un tubo in plexiglass dal diametro di 25 mm con una lunghezza di 152 mm. Le zone predisposte al fissaggio dei porta-elettrodi (le cui dimensioni e materiale costitutivo non sono variati) hanno una corsa di 15 mm ed un diametro della zona filettata di 10 mm creando una zona utile per la generazione del plasma lunga in tutto 122 mm con un diametro del canale interno di 4 mm. Nella zona inferiore della sorgente è presente un foro passante dal diametro di 8,50 mm per consentire l'ingresso dell'Argon e l'aspirazione dell'aria da parte della pompa. Per operare il disaccoppiamento tra la zona d'aspirazione e la zona in cui la scarica si innesca si è reso modulabile anche l'elettrodo di terra (anch'esso, come quelli di alta tensione, in ottone) montandone sul corrispettivo porta-elettrodo uno di 30 mm di lunghezza ed un diametro di 4 mm riducendo la zona utile di generazione a 100 mm. Gli elettrodi di alta tensione, come quelli usati nella soluzione prototipale precedente, sono definiti da una lunghezza di 75 e 50 mm, creando un gap interelettrodo rispettivamente di 25 e 50 mm, che sono stati esplorati durante le caratterizzazioni e le misurazioni elettriche mostrate in seguito.

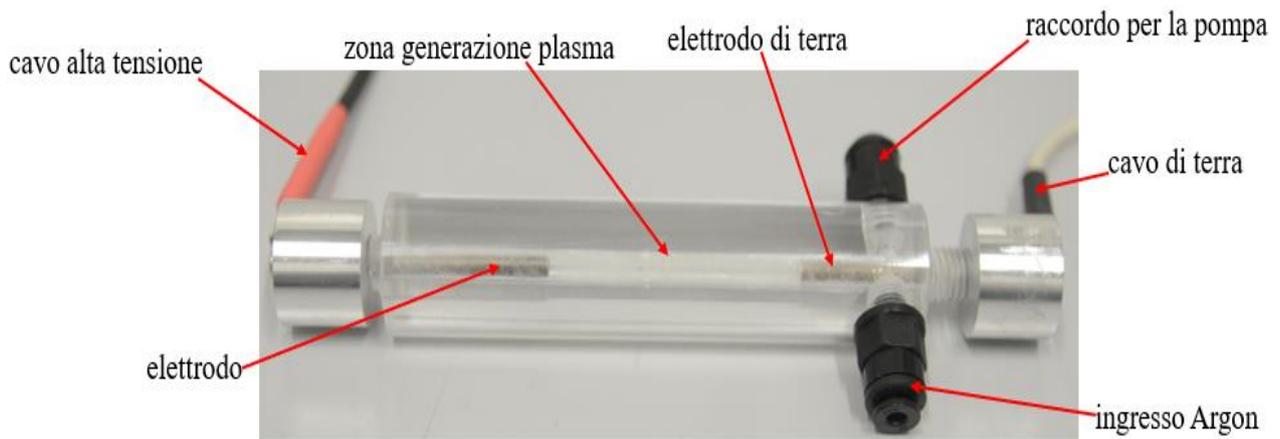


Figura 3.9: Foto della terza sorgente sviluppata

### 3.2 SET-UP E CARATTERIZZAZIONI ELETTRICHE

I set-up utilizzati comprendono un generatore di tensione, tra quelli precedentemente citati, una pompa per raggiungere le basse pressioni modello VPM 42, la strumentazione per l'analisi elettrica, un manometro e la sorgente plasma prima mostrata; quanto citato non è variato per tutti i test eseguiti ad eccezione del generatore di tensione utilizzato, della presenza o meno di un flussimetro per Argon ((Bronkhorst, EL-FLOW) e del banco di resistenze in serie prima mostrato. Per quanto riguarda la caratterizzazione elettrica, questa è l'insieme delle misure elettriche necessarie per il calcolo della potenza nelle varie condizioni operative testate; le potenze analizzate sono quella media, calcolata attraverso la media delle potenze istantanee, e quella sul periodo, ottenuta tramite l'integrale calcolato sul periodo T del prodotto V•I.

$$P = \frac{1}{T} \int_V I(t) dt$$

Per stimare le dispersioni dei dati e quindi le relative incertezze si è calcolato lo scarto quadratico medio, o deviazione standard, per quest'ultimi in modo da stimare la variabilità dei dati in questione.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad \left( \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)$$

Dove N è il numero di unità della popolazione di dati e  $\bar{x}$  risulta essere la media aritmetica delle x in esame come indicato dall'equazione tra parentesi.

Il voltaggio e la corrente sono stati misurati attraverso le rispettive sonde di alta tensione (Tektronix P6015A) e di corrente (Pearson 6585), le forme d'onda corrispondenti sono state registrate usando un oscilloscopio digitale (Tektronix DPO4034; 350MHz, 2.5GSa/s) e riportate nei grafici.

Data la grande mole di dati si è scelto di tenere fisse alcune variabili esplorando quelle ritenute di maggiore interesse per questa fase embrionale del progetto. In particolare si è scelta una pressione costante minima concessa dalla pompa di 0,3 bar ed una di 0,5 bar a seconda che nella sorgente plasma fosse presente aria o Argon e di far lavorare il flussimetro in modo da avere costantemente 2 NL/min (litri normali al minuto) di Argon. Si sono fatte variare quindi le distanze interelettrode e, grazie ad i generatori, tensione e frequenza.

### 3.2.1 Amazing One

Il primo gruppo di test è stato svolto usufruendo dell'Amazing One, un generatore di tensione sinusoidale, tramite cui sono state esplorate le differenze tra la presenza di aria ed Argon all'interno del prototipo. Questo generatore non consente di variare a piacimento tensione e frequenza in quanto, come detto precedentemente, sono dipendenti tra loro. Per tale motivo si è optato per tenere fissa la frequenza a 20 kHz, la minima consentita per lavorare con tensioni adeguate senza che l'interdipendenza delle variabili infici sul corretto funzionamento dell'Amazing one, facendo variare la tensione. I due set-up, mostrati nelle figure 3.10 e 3.11, non presentano alcuna differenza se non la presenza del flussimetro nel secondo, data la volontà in quel caso di lavorare con Argon.

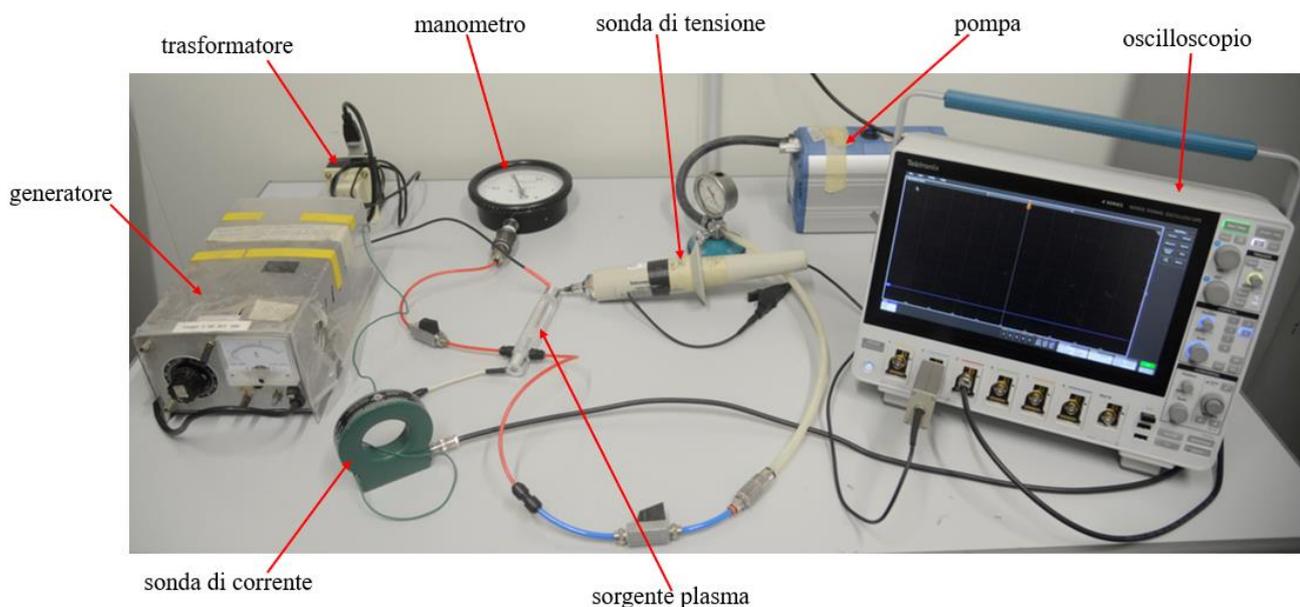


Figura 3.10: Foto del set-up utilizzato

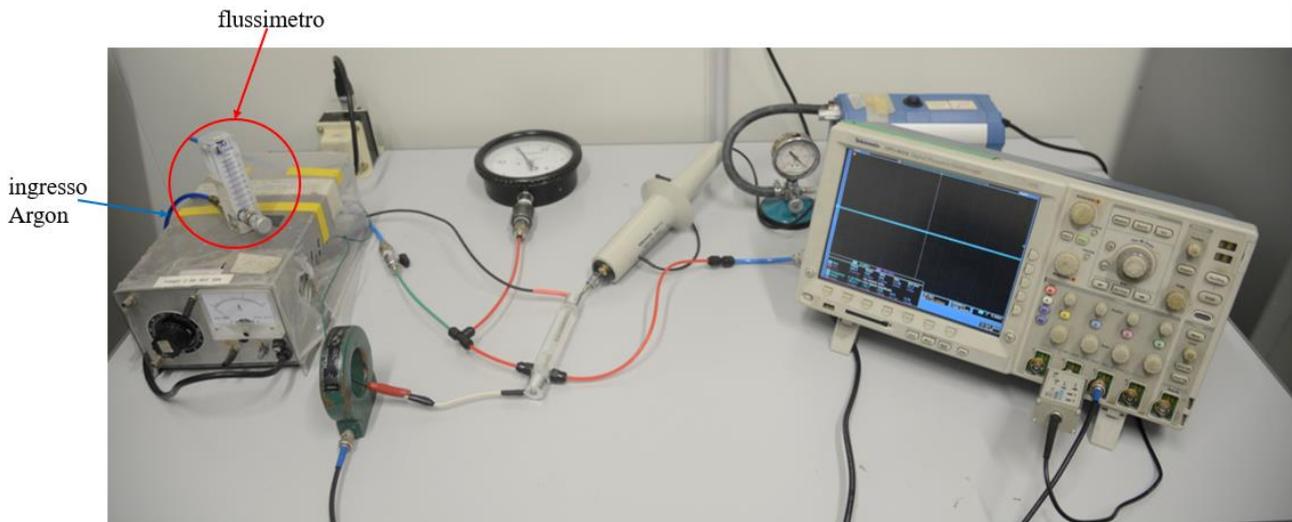


Figura 3.11: Set-up con flussimetro per Argon

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 6.1, presente in appendice a pagina 66, e nei grafici di seguito mostrati e discussi nel capitolo successivo. Per ciascuna condizione operativa sono stati svolti tre test per un totale di 36, 18 per il primo set-up ed altrettanti per il secondo, facendo variare la distanza tra gli elettrodi, il gas presente e la tensione emessa dal generatore. La prima serie, corrispondente al grafico 3.13 ed alla tabella 6.1 in appendice, riguarda gli esperimenti in aria, la seconda, corrispondente al grafico 3.14 ed alla medesima tabella, quelli in Argon. Di seguito è anche riportata una forma d'onda caratteristica (grafico 3.12).

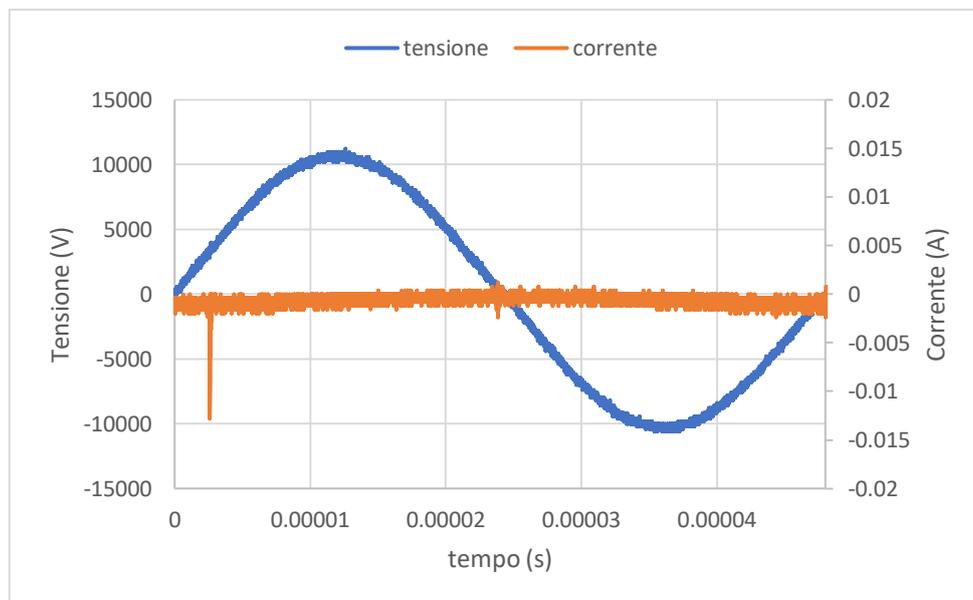


Grafico 3.12: Forma d'onda caratteristica usando l'Amazing one in aria con un gap di 50 millimetri, una tensione di 11 kV ed una frequenza di 20 kHz

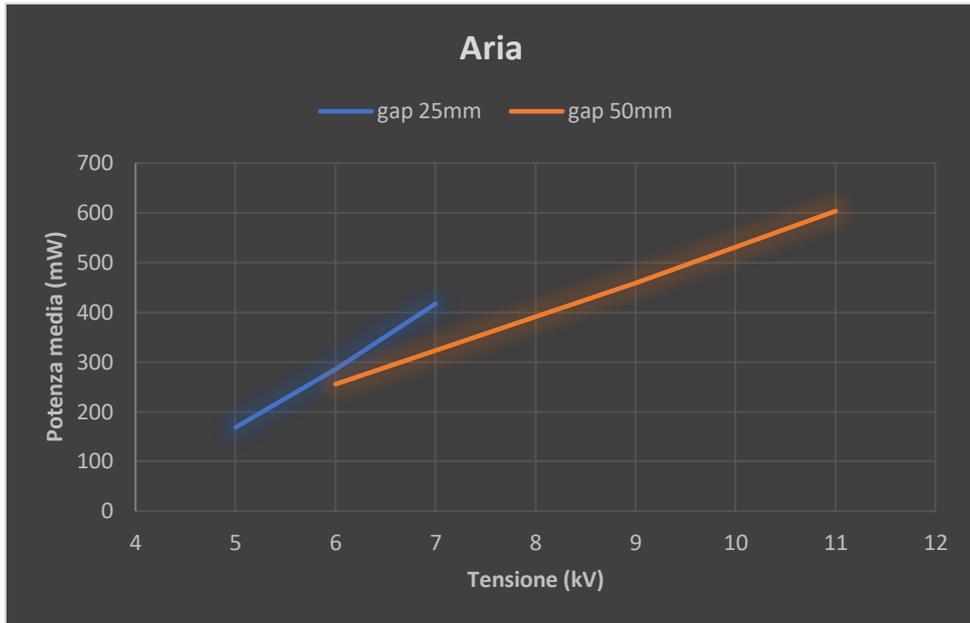


Grafico 3.13: Andamento della potenza in aria con un gap interelettrodo variabile



Grafico 3.14: Andamento della potenza in Argon con un gap interelettrodo variabile

breakdown

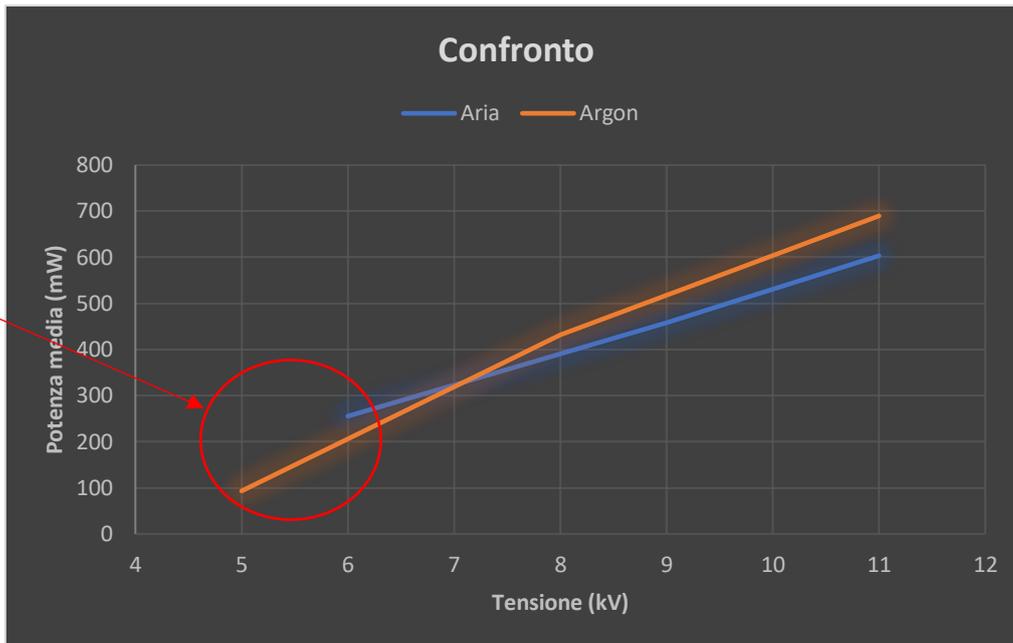
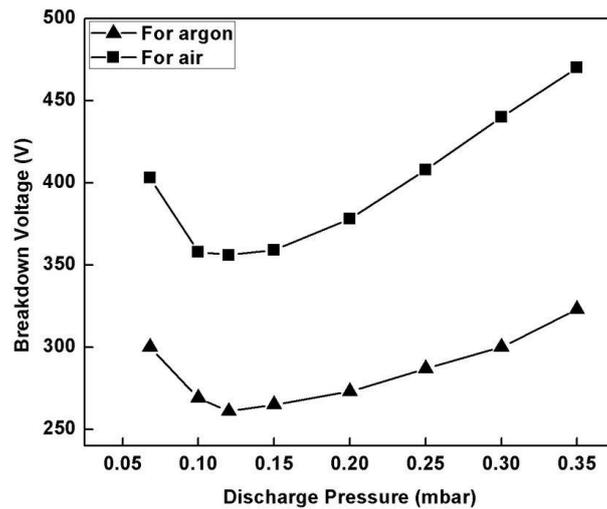


Grafico 3.15: Confronto degli andamenti della potenza per lo stesso gap interelettrodo di 50 millimetri e variando il gas usato

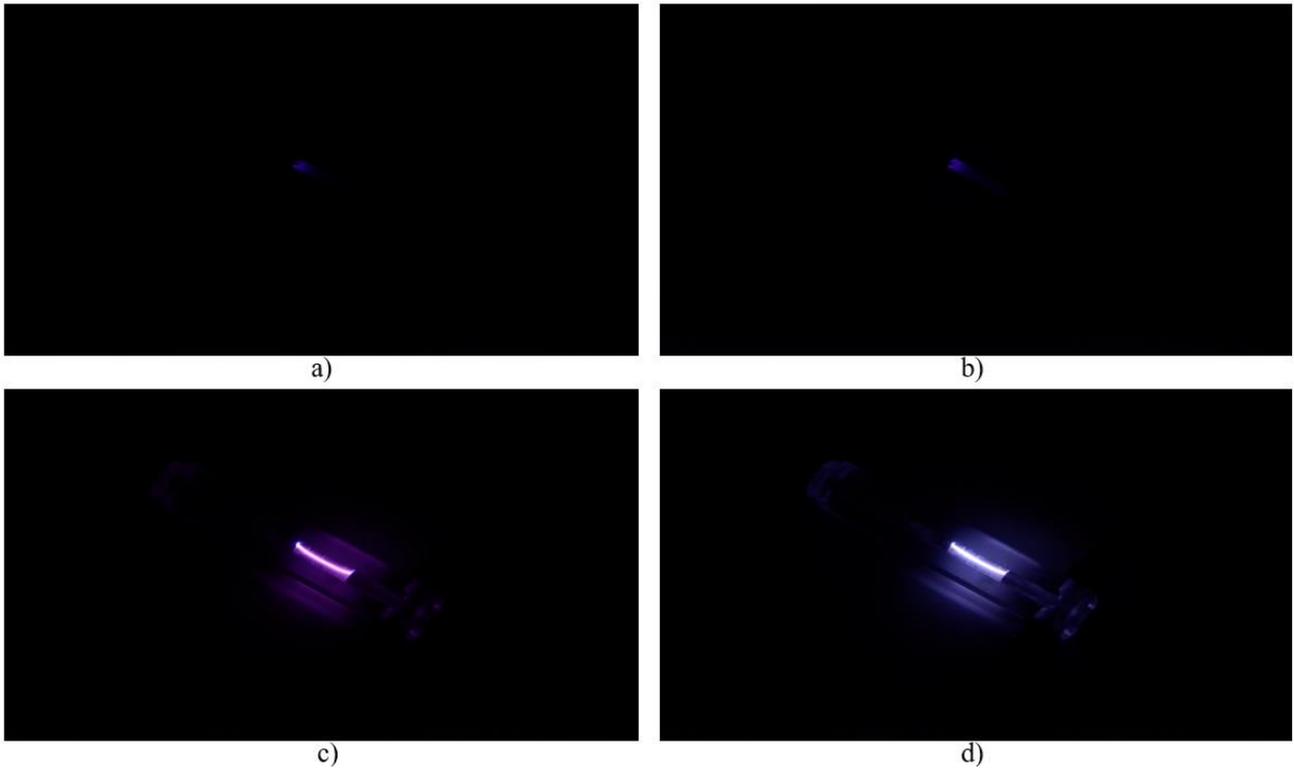
### 3.2.2 Discussione risultati

Come emerso dai grafici un aumento di tensione sia in aria che in Argon ha comportato un aumento della potenza assorbita dalla sorgente; si nota inoltre che avvicinando gli elettrodi portando il divario da 50 a 25 mm la potenza che il prototipo assorbe cresce, e ciò si verifica lavorando con entrambi i gas. Un ulteriore aspetto che emerge dal grafico 3.15, in cui si confrontano gli andamenti della potenza per la sorgente soggetta ad aria ed Argon per il medesimo divario interelettrodo, è quello per cui risulta favorito l'innesco del plasma in Argon, dato che esso si verifica ad una tensione inferiore rispetto che in Aria. Tale fenomeno si verifica in quanto il potenziale di *breakdown*, ovvero la tensione minima per il quale si ha l'innesco del gas ionizzato, risulta essere minore in Argon piuttosto che in aria, come emerge anche dalle curve di Paschen.

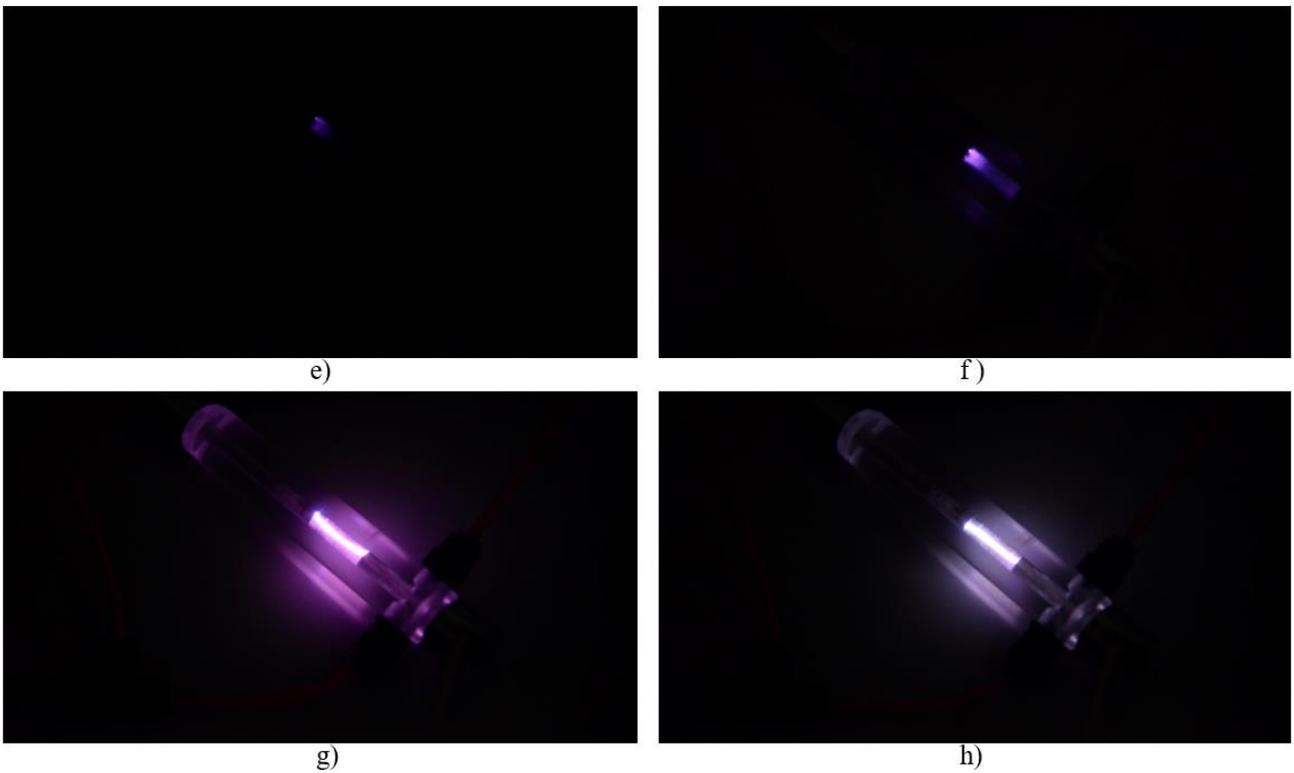


*Grafico 3.16: Andamento dei potenziali di breakdown a confronto*

Sono state anche riportate foto della scarica di plasma durante gli esperimenti (figure 3.17, 3.18, 3.19, 3.20), queste mostrano visivamente l'evoluzione della scarica all'aumentare della tensione applicata. Come si evince dalle immagini, per ogni sequenza, si osserva come la scarica si vada a localizzare su un elettrodo, in particolare quello di alta tensione, per poi "allungarsi" all'aumentare della tensione applicata fino a raggiungere una tensione per cui si ottiene un filamento di plasma vero e proprio. Questo risulta stabile per pochi istanti di tempo poiché transisce immediatamente ad arco, se si permane a quelle condizioni operative o se le si aumentano, il quale va spento in quanto comprometterebbe l'integrità del sistema. Non è stato possibile salvare i dati di tensione e corrente durante la transizione ad arco perché le forme d'onda risultavano disturbate.



*Figura 3.17: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione in aria con una distanza interelettroica di 25 mm. Tensioni raffigurate: a) 5 kV; b) 6 kV; c) 7 kV; d) transizione ad arco andando oltre*



*Figura 3.18: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione in Argon con una distanza interelettroica di 25 mm. Tensioni raffigurate: e) 4 kV; f) 6 kV; g) 8 kV; h) transizione ad arco andando oltre*

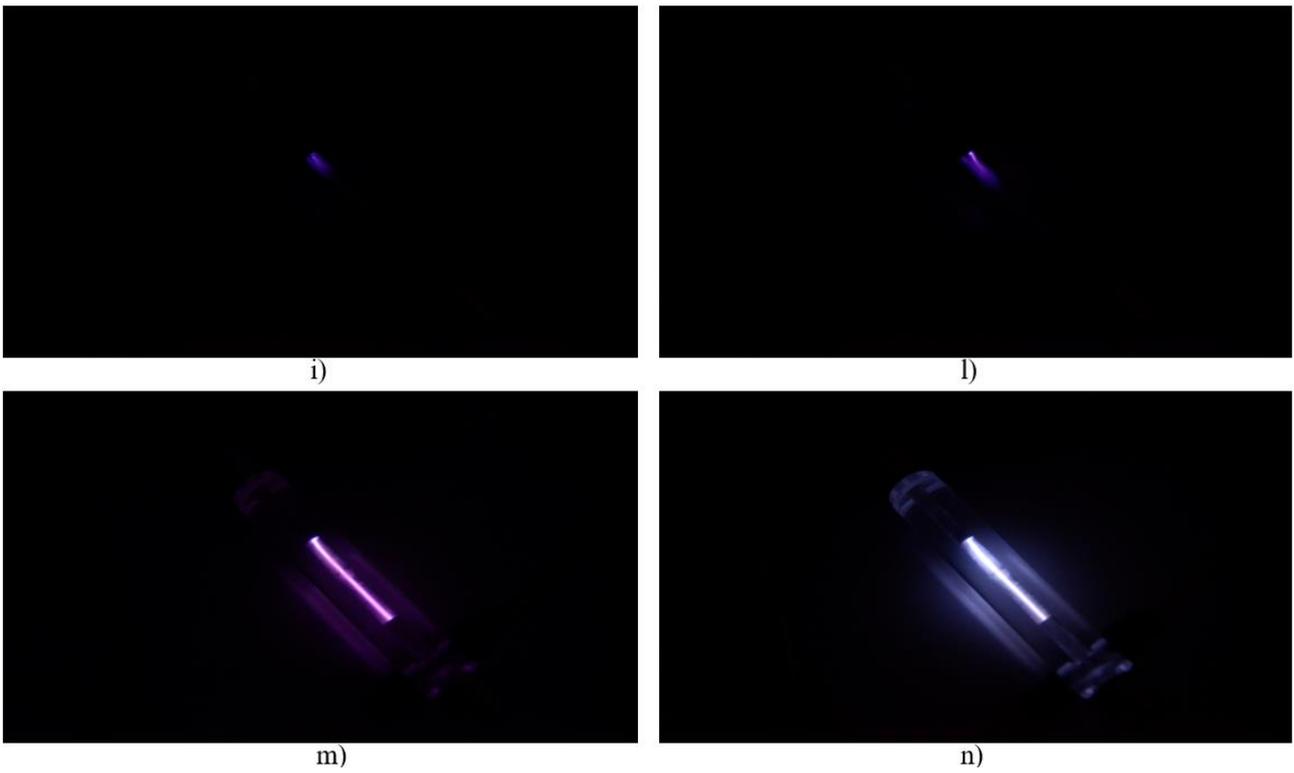


Figura 3.19: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione in aria con una distanza interelettrodica di 50 mm. Tensioni raffigurate: i) 6 kV; l) 9 kV; m) 11 kV; n) transizione ad arco andando oltre

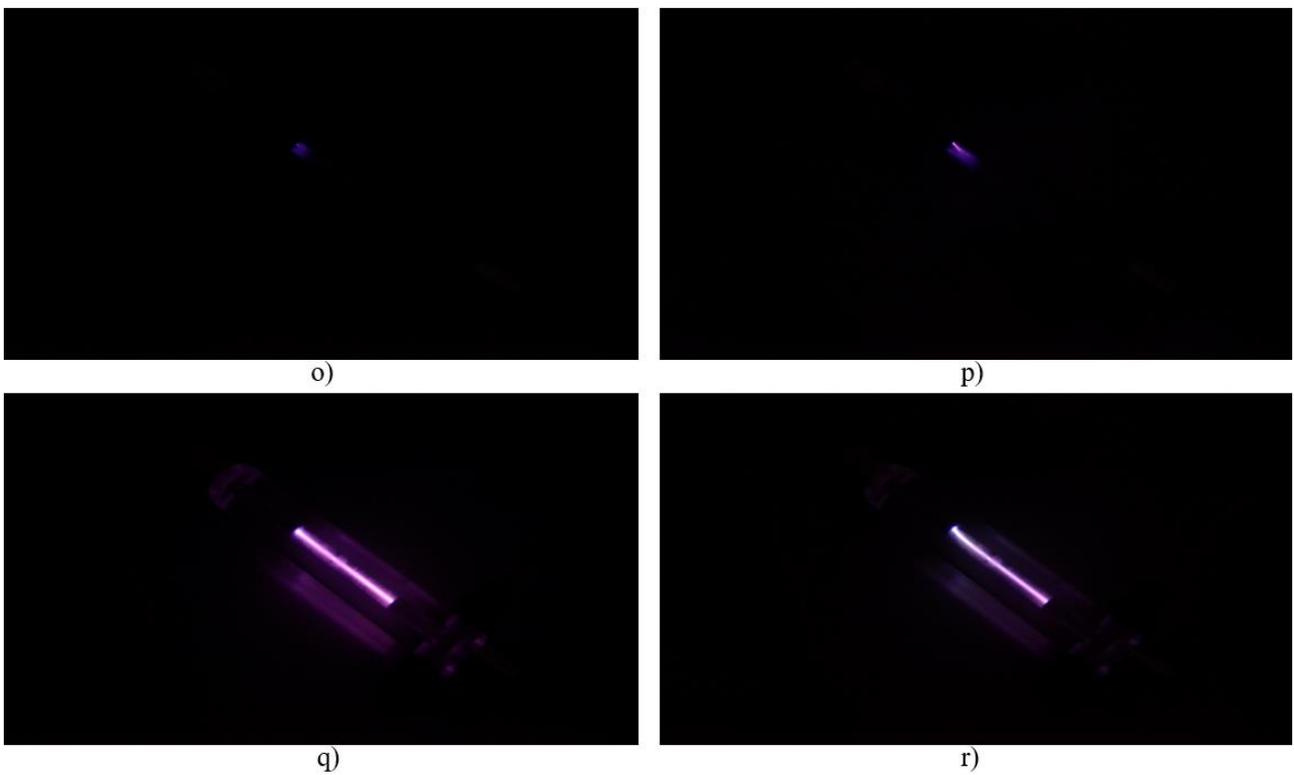


Figura 3.20: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione in Argon con una distanza interelettrodica di 50 mm. Tensioni raffigurate: o) 5 kV; p) 8 kV; q) 11 kV; r) transizione ad arco andando oltre

Alla luce di queste considerazioni, è emersa la volontà di ottenere una scarica *glow* anche per garantire una maggiore stabilità del sistema. Per muoversi in questa direzione ed esplorare altre condizioni operative, per i prossimi esperimenti mostrati si è tornati ad utilizzare l'AlmaPULSE, oltre che l'Amazing one, avvalendosi del banco di resistenze mostrato in precedenza (figura 3.8), in modo da ridurre la corrente in gioco ovviando alle problematiche incontrate con il vecchio prototipo (prototipo due). Oltre a ciò, si è deciso di svolgere i test successivi solo in Argon, in quanto presenta un potenziale di breakdown più basso dell'aria ed è quindi di maggiore interesse.

### 3.2.3 Confronto Amazing One ed AlmaPULSE con resistenze

Come detto alla fine dello scorso paragrafo, queste serie di esperimenti sono stati eseguiti per esplorare ulteriori condizioni operative ed il relativo comportamento della sorgente plasma avvalendosi di due generatori di tensione: l'Amazing One, usato anche precedentemente, e l'AlmaPULSE. I set-up utilizzati, mostrati in figura 3.21 e 3.22, sono i medesimi ad eccezione del generatore. È stato studiato solo il comportamento con Argon facendo variare la tensione ad una frequenza costante di 20 kHz per il generatore sinusoidale, per i motivi già spiegati nei paragrafi scorsi, mentre per quello micropulsato sarà possibile osservare il comportamento della scarica a differenti tensioni e frequenze. La pressione in gioco è stata mantenuta costante a 0,5 bar lavorando, per l'appunto, solo in Argon.

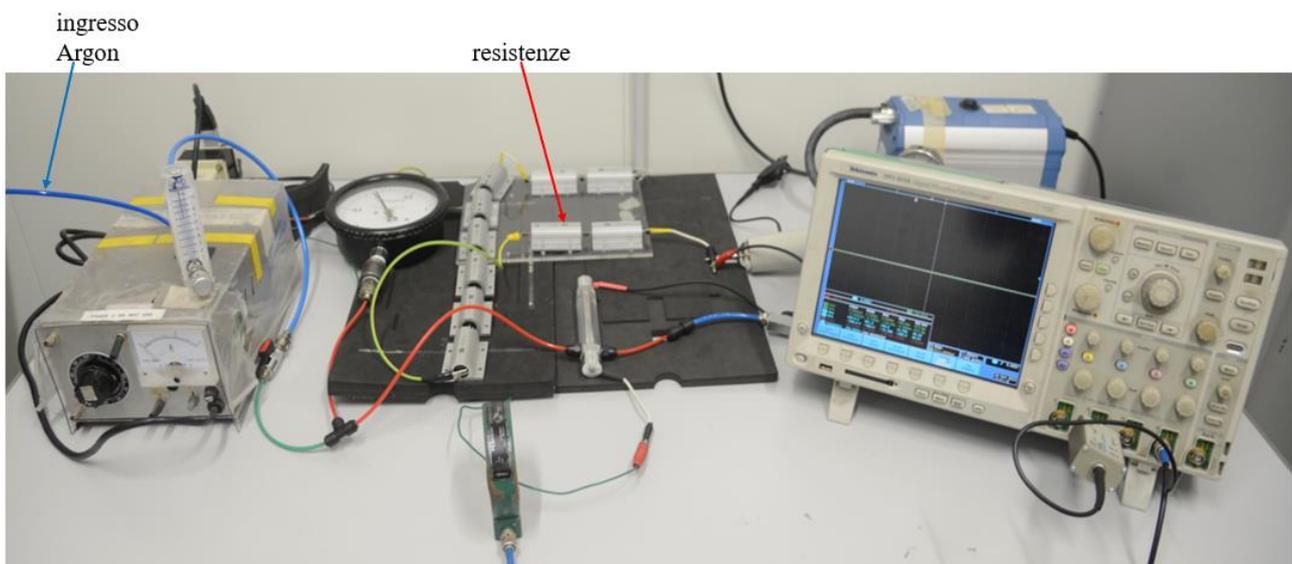


Figura 3.21: Foto del set-up utilizzato con Amazing One ed il banco di resistenze

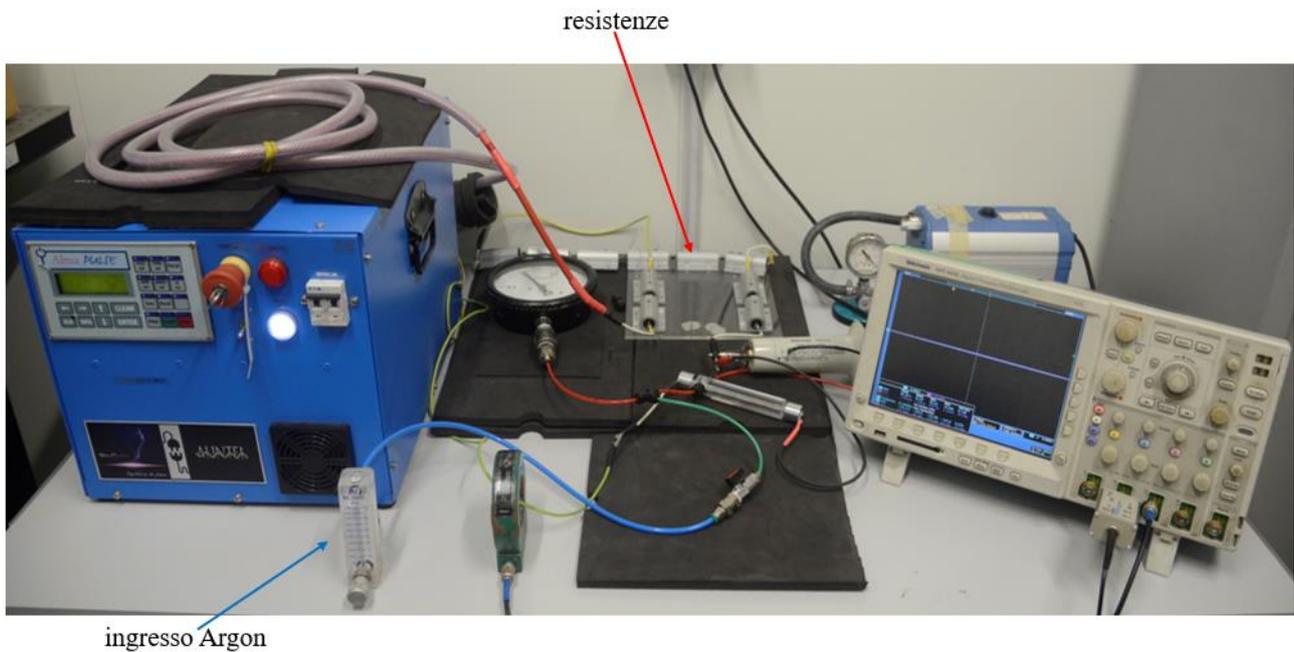


Figura 3.22: Foto del set-up utilizzato con AlmaPULSE ed il banco di resistenze

I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle 6.2 e 6.3, presenti in appendice a pagina 66 e 67, e nei grafici di seguito mostrati e discussi nel capitolo successivo. Per ciascuna condizione operativa sono stati svolti tre test per un totale di 126, 30 per il primo e 96 per il secondo, facendo variare la distanza tra gli elettrodi, la tensione e, per l'AlmaPULSE, la frequenza emessa dal generatore. La prima serie, corrispondente al grafico 3.26 ed alla tabella 6.2 in appendice, riguarda gli esperimenti con l'Amazing One, la seconda, corrispondente ai grafici 3.27 e 3.28 ed alla tabella 6.3, quelli con l'AlmaPULSE. Di seguito sono anche riportate le relative forme d'onda caratteristiche (grafici 3.23, 3.24 e 3.25).

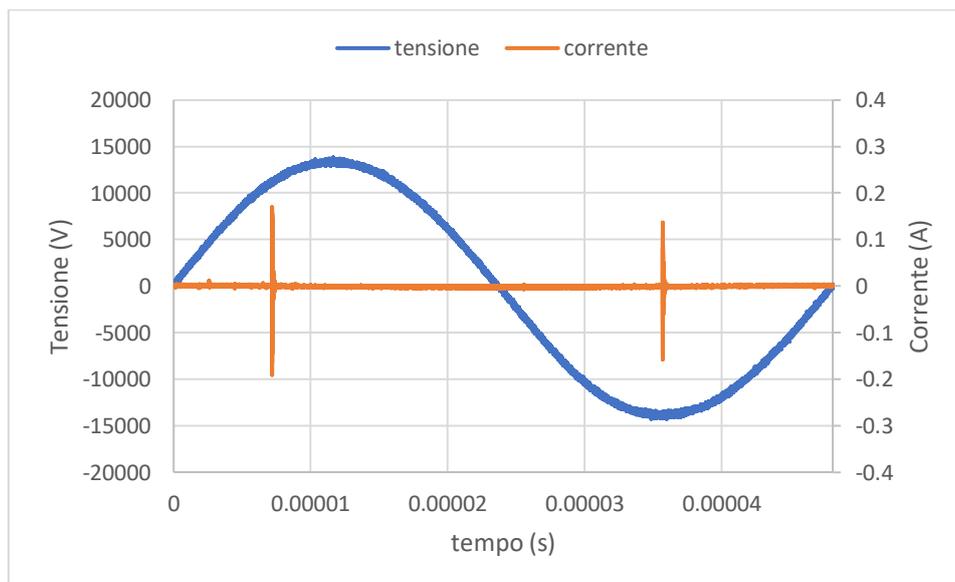


Grafico 3.23: Forma d'onda caratteristica usando l'Amazing one con un gap di 25 mm, una tensione di 12 kV ed una frequenza di 20 kHz

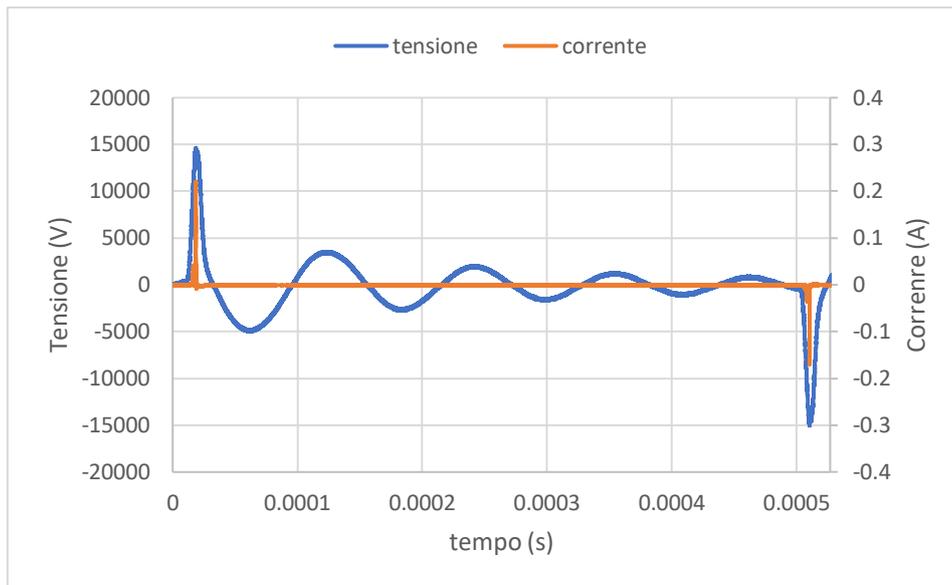


Grafico 3.24: Forma d'onda caratteristica usando l'AlmaPULSE con un gap di 25 mm, una tensione di 13 kV ed una frequenza di 1 kHz

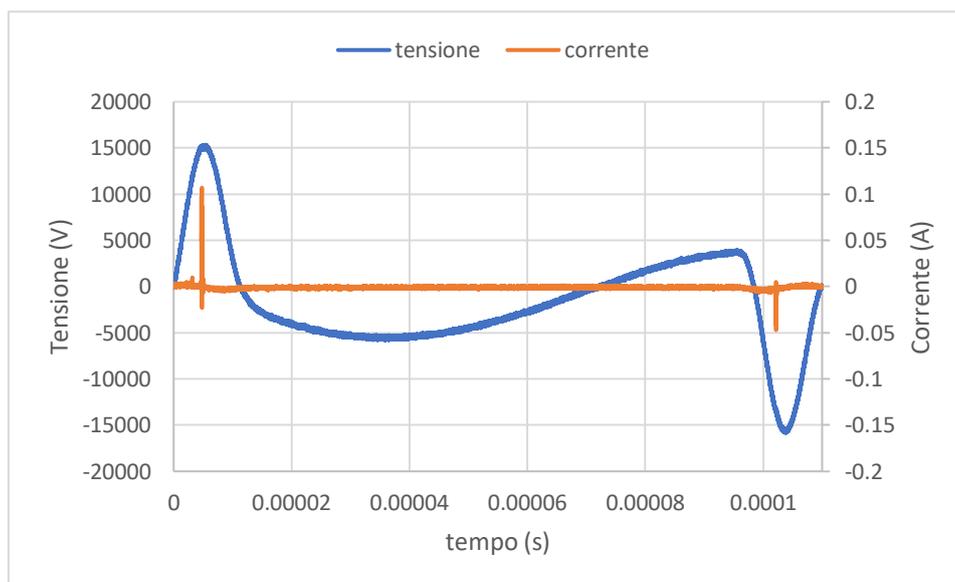


Grafico 3.25: Forma d'onda caratteristica usando l'AlmaPULSE con un gap di 25 mm, una tensione di 13 kV ed una frequenza di 5 kHz

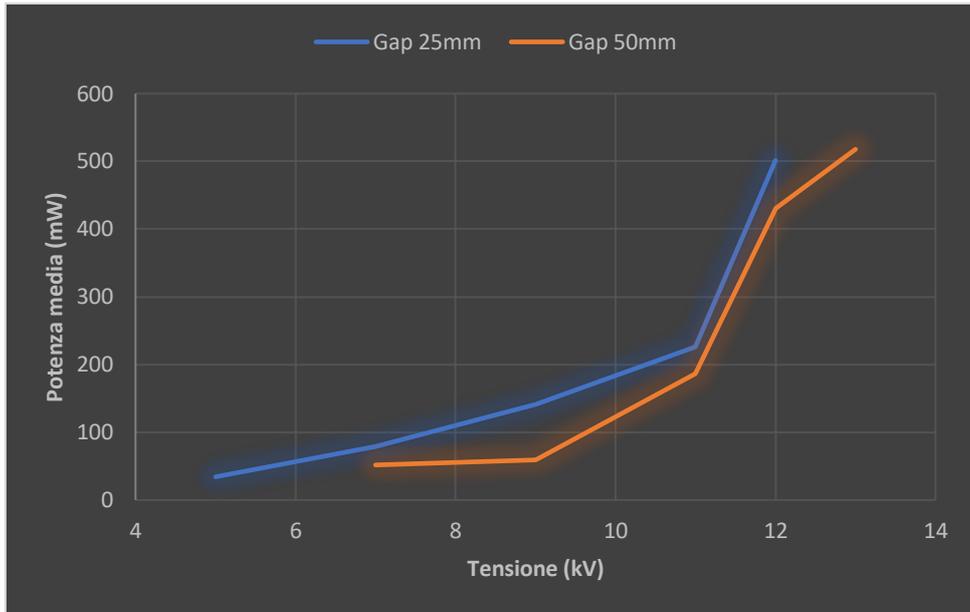


Grafico 3.26: Andamento della potenza usando l'Amazing One con gap interelettrodo variabile ad 1 kHz di frequenza

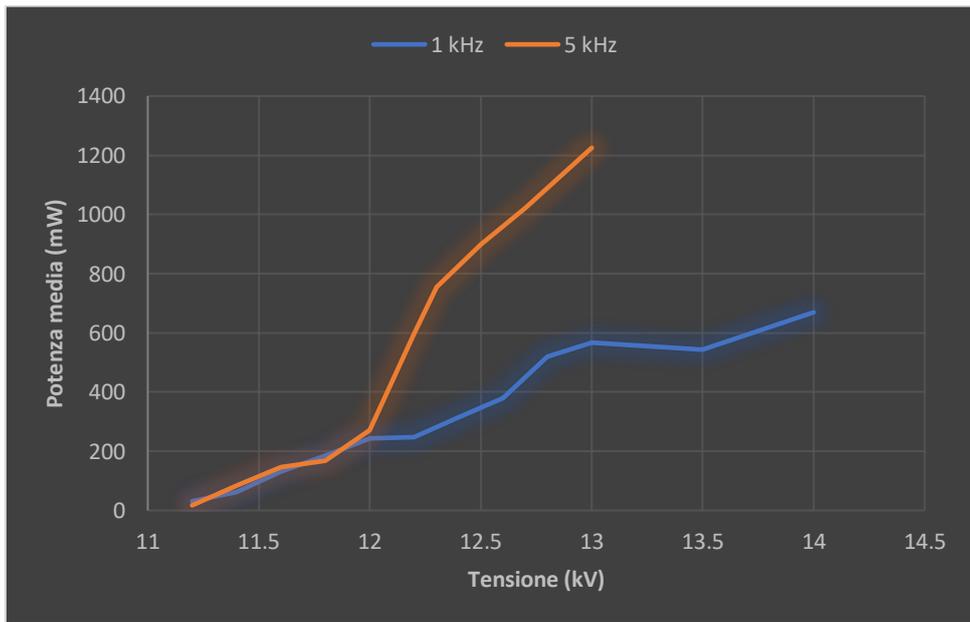


Grafico 3.27: Confronto degli andamenti della potenza usando l'AlmaPULSE con lo stesso gap interelettrodo di 25 mm a diverse frequenze

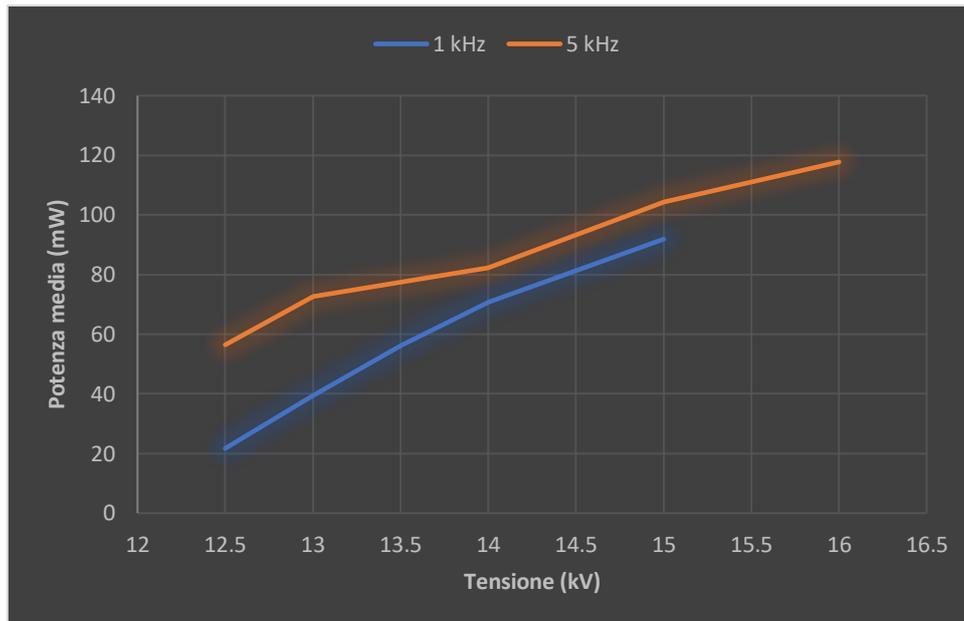


Grafico 3.28: Confronto degli andamenti della potenza usando l'AlmaPULSE con lo stesso gap interelettrodico di 50 mm a diverse frequenze

### 3.2.4 Discussione risultati

Come emerso dai grafici un aumento di tensione e frequenza ed una diminuzione di distanza tra gli elettrodi comportano, indipendentemente dal generatore in uso, un aumento della potenza assorbita dalla sorgente.

Un'informazione che emerge dal grafico 3.26 è quella per cui si nota come la tensione per la quale si ha l'innesco della scarica è risultata essere maggiore del caso precedente in cui l'Amazing One lavorava senza le resistenze. Dalle figure 3.29 e 3.30, in cui sono state riportate le immagini rappresentanti le evoluzioni temporali della scarica, si denota un andamento simile rispetto al caso del paragrafo scorso senza che però avvenga la transizione ad arco del plasma a causa dell'attenuazione della corrente da parte del banco di resistenze in serie. Il plasma, infatti, presenta una natura di tipo *glow* e non più filamentare che è stato in grado di mantenere, questo almeno per gli esperimenti svolti con una distanza interelettrodica di 25 mm. Dalle foto (figura 3.30) emerge infatti che per un gap di 50 mm il plasma rimane localizzato sull'elettrodo di alta tensione non riuscendo ad occupare l'intero volume utile. Ciò avviene in quanto non è stata aumentata ulteriormente la tensione perché il generatore non lo permetteva. La situazione è cambiata con l'AlmaPULSE.

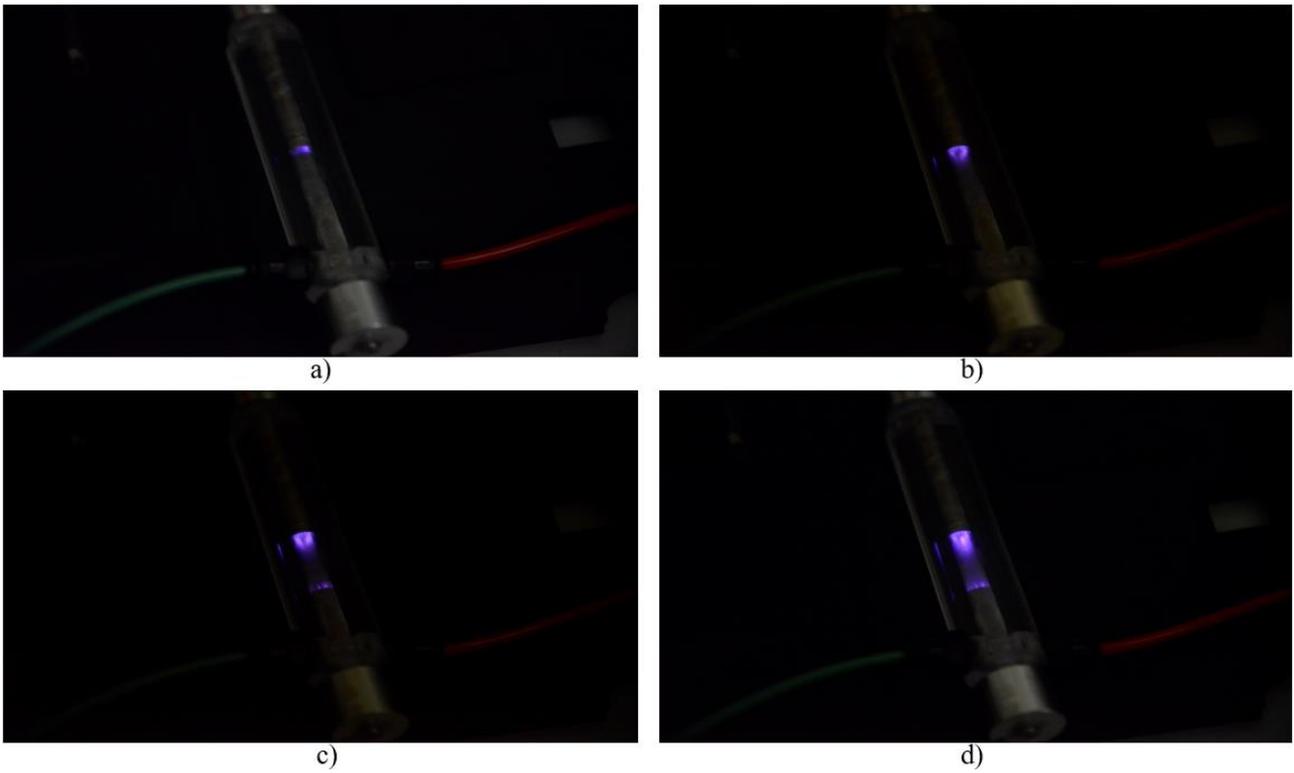


Figura 3.29: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione usando l'Amazing One con una distanza interelettrodica di 25 mm. Tensioni raffigurate: a) 5 kV; b) 9 kV; c) 11 kV; d) 12 kV

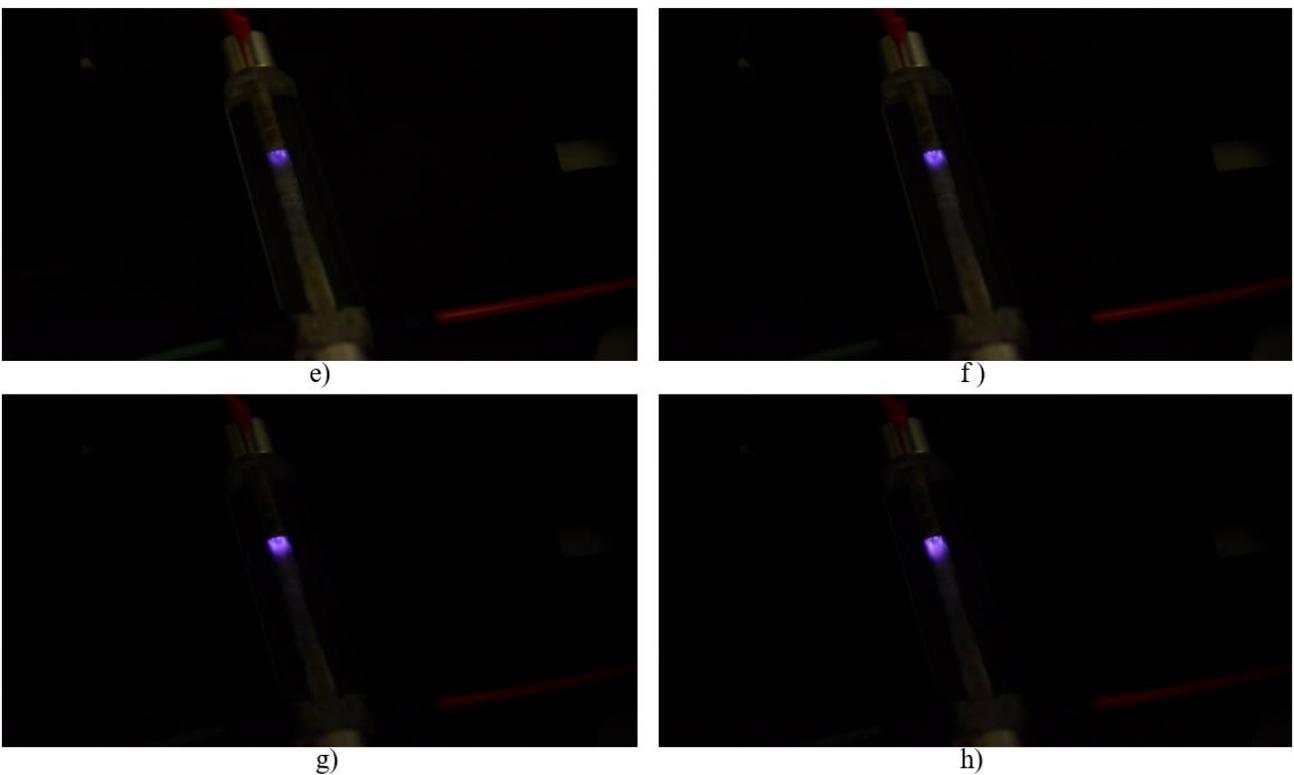
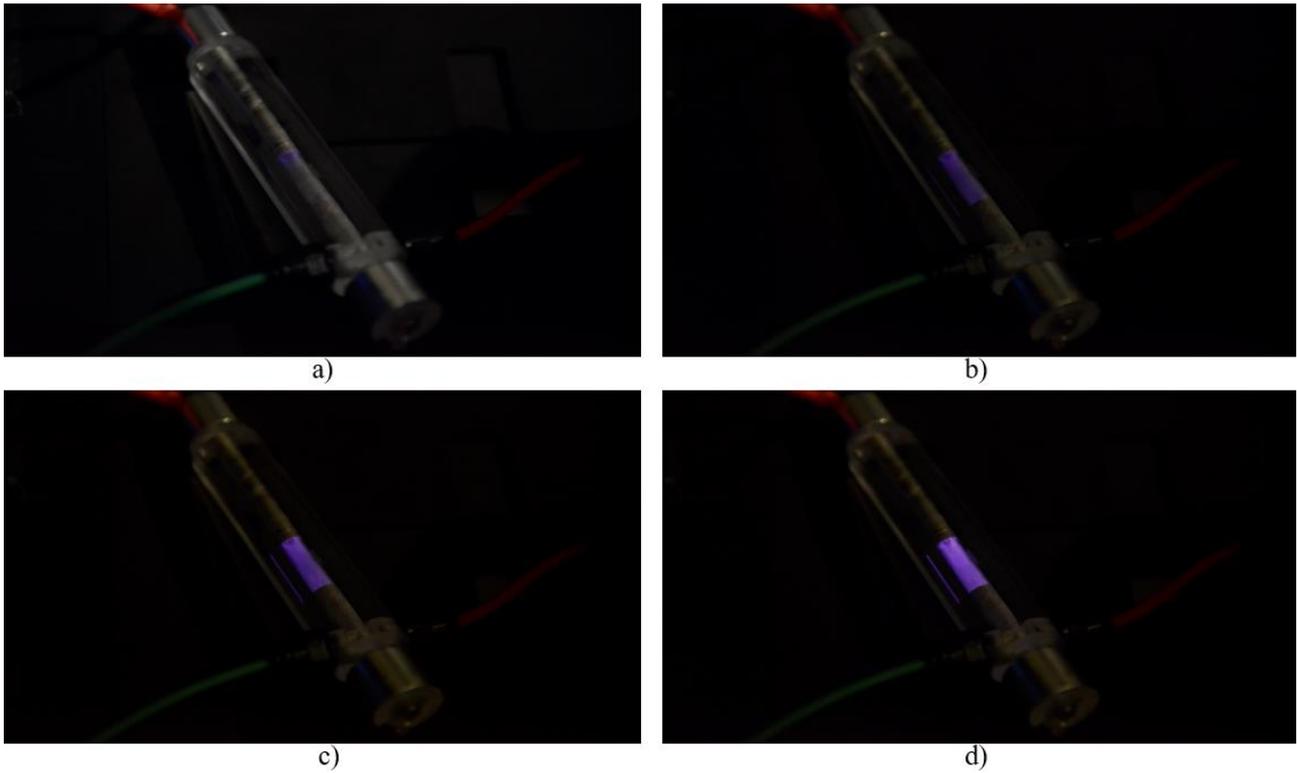


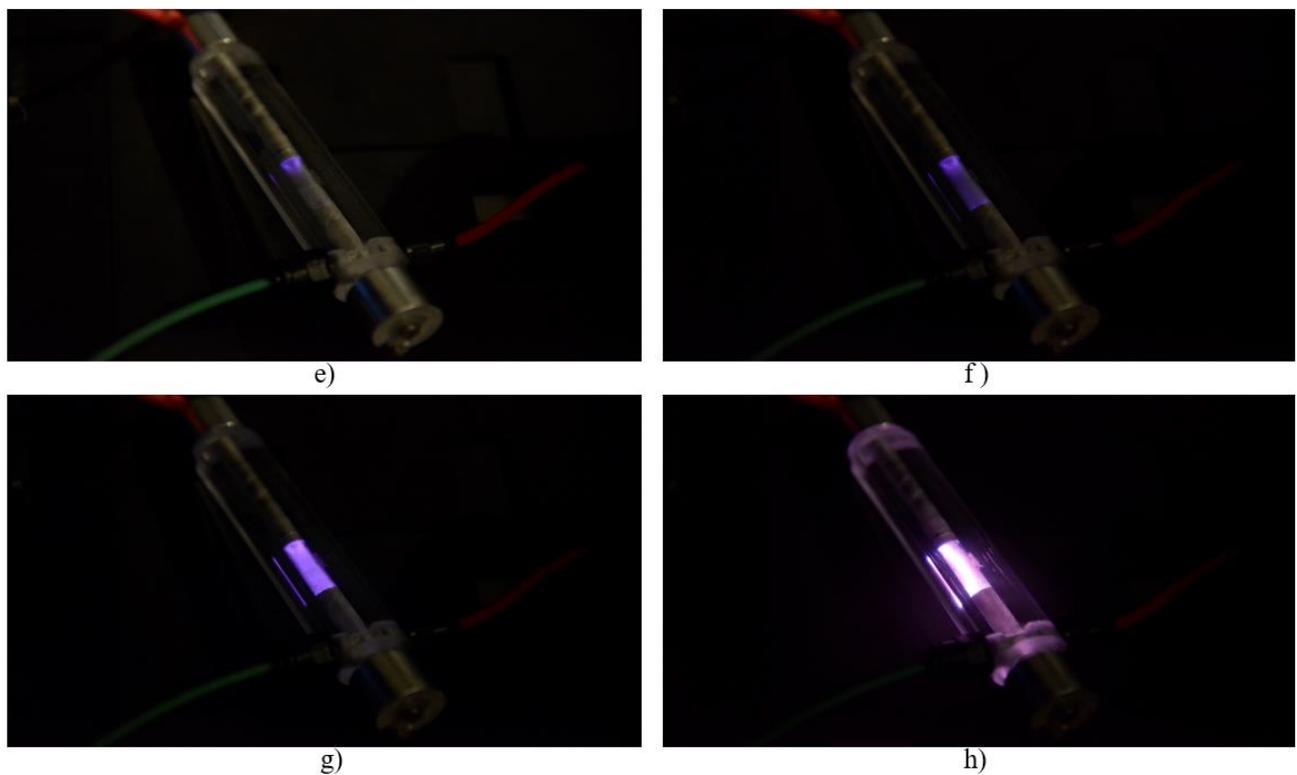
Figura 3.30: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione usando l'Amazing One con una distanza interelettrodica di 50 mm. Tensioni raffigurate: e) 7 kV; f) 9 kV; g) 12 kV; h) 13 kV

Per quanto concerne l'AlmaPULSE, le tensioni di *breakdown* sono risultate maggiori rispetto a quelle osservate per l'Amazing One, anche perché è stato possibile farlo lavorare a frequenze minori rispetto a quest'ultimo ed è quindi stato necessario raggiungere tensioni maggiori. Come si può osservare dai grafici 3.27 e 3.28 e dalla tabella 6.3, variando la frequenza da 1 a 5 kHz la tensione di innesco della scarica non varia mostrando un andamento di potenza media, almeno iniziale, simile per il caso rappresentante un divario elettrodo di 25 mm.

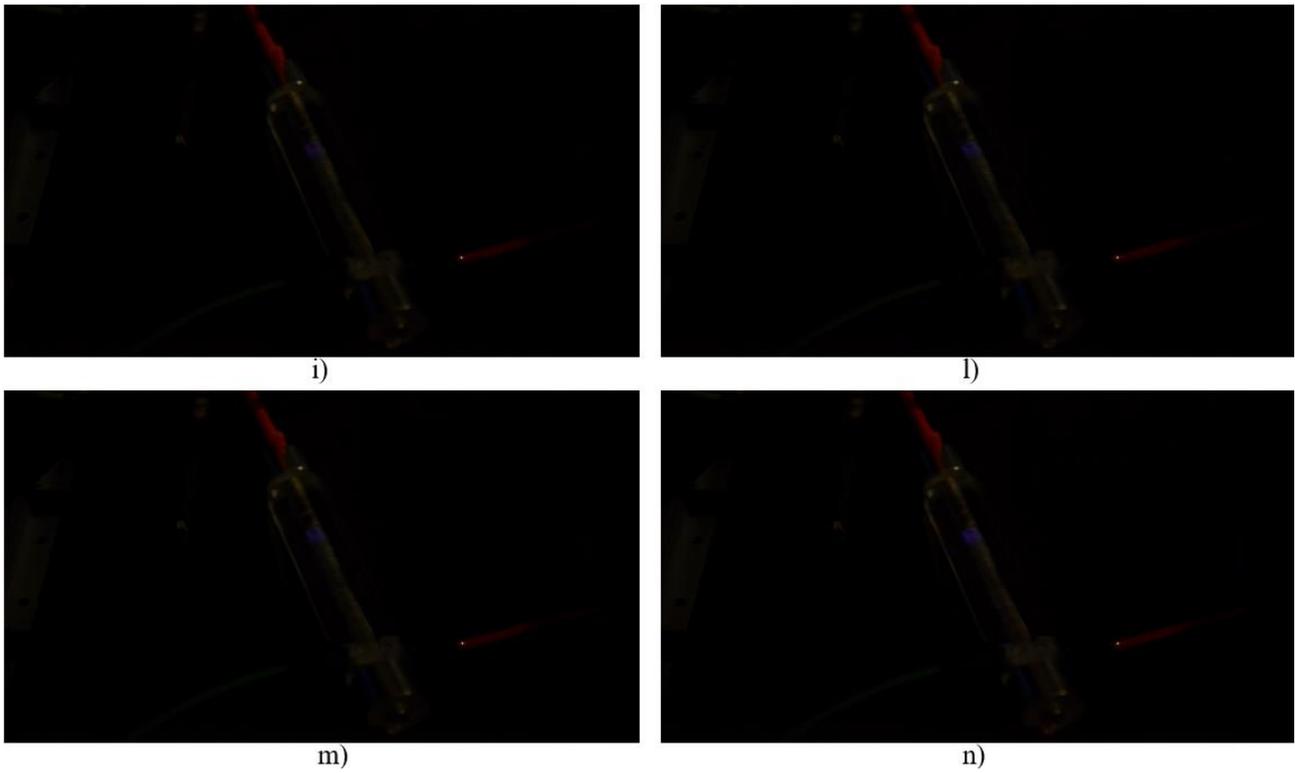
Analizzando le immagini nelle figure sottostanti si nota come la scarica abbia un'evoluzione simile rispetto ai casi già mostrati evidenziando però come la natura *glow* del plasma sia più netta e stabile ed in grado di distribuirsi molto più uniformemente lungo tutto il volume utile della sorgente rispetto a quella ottenuta con l'Amazing One. In particolare, nei casi mostrati nelle figure 3.31 e 3.32, si osserva come aumentando la frequenza da 1 a 5 kHz non sia possibile spingersi oltre i 13 kV in quanto si incorre in una transizione ad arco. Per le immagini rappresentanti il caso con distanza tra gli elettrodi di 50 mm (figure 3.33 e 3.34), si evince come la caratteristica *glow* non sia stata possibile da raggiungere in quanto la scarica è rimasta localizzata sugli elettrodi anche per tensioni oltre i 15 kV. Spingersi a tensioni e frequenze maggiori di quelle esplorate non risulta interessante ai fini del progetto anche e soprattutto per una questione di sicurezza dell'utilizzatore finale.



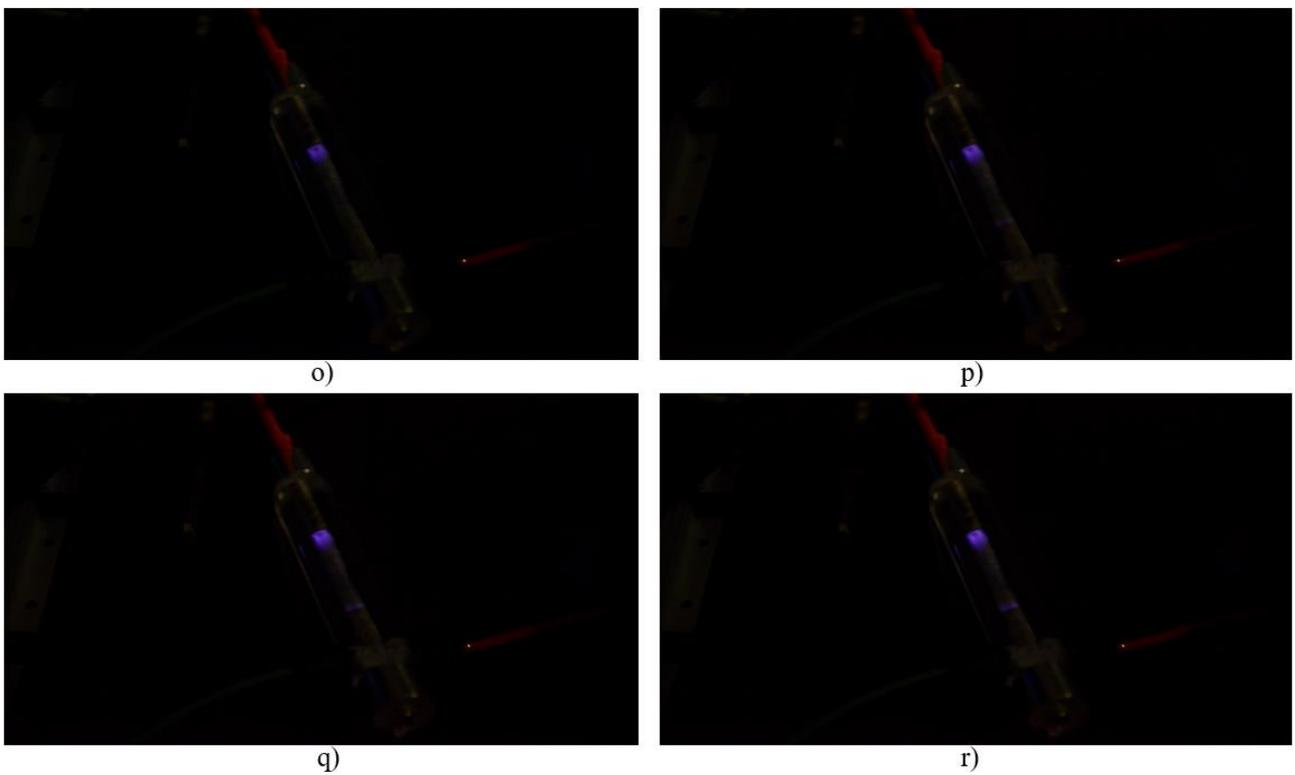
*Figura 3.31: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione usando l'AlmaPULSE con una distanza interelettrodica di 25 mm. Tensioni raffigurate: a) 11,2 kV; b) 12 kV; c) 13 kV; d) 14 kV*



*Figura 3.32: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione usando l'AlmaPULSE con una distanza interelettrodica di 25 mm. Tensioni raffigurate: e) 11,2 kV; f) 12 kV; g) 13 kV; h) transizione ad arco andando oltre*



*Figura 3.33: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione usando l'AlmaPULSE con una distanza interelettroica di 50 mm. Tensioni raffigurate: i) 12,5 kV; l) 13 kV; m) 14 kV; n) 15 kV*

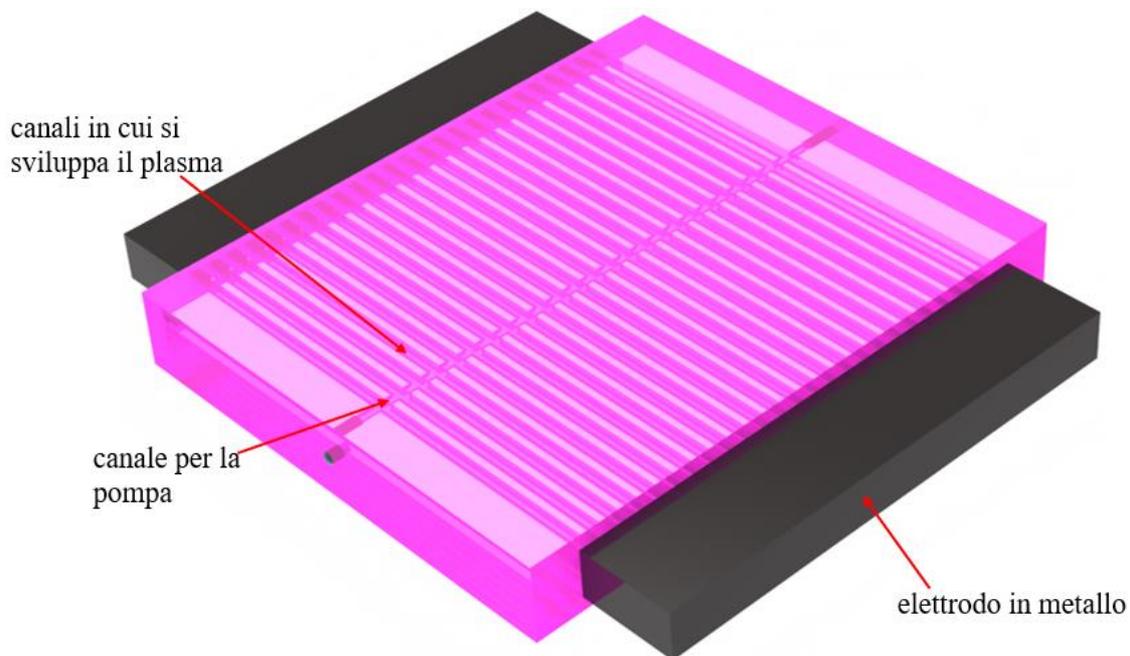


*Figura 3.34: Foto dell'evoluzione della scarica con la tensione usando l'AlmaPULSE con una distanza interelettroica di 50 mm. Tensioni raffigurate: i) 12,5 kV; l) 14 kV; m) 15 kV; n) 16 kV*

La natura *glow* del plasma osservata nel caso con le resistenze risulta essere molto interessante in quanto occupa il volume utile del prototipo in maniera molto più uniforme rispetto ad una scarica di tipo filamentare osservata nel caso senza resistenze. Confrontando il lavoro di ciascun generatore con resistenze si nota come la sorgente si comporti in maniera simile nei confronti di entrambi mantenendo la sua integrità strutturale per tutti gli esperimenti svolti, dimostrando che l'attenuazione della corrente, e quindi della potenza, operata dal banco di resistenze in serie sia stata utile per l'utilizzo corretto del generatore sinusoidale. La potenza media in gioco assorbita dal prototipo risulta essere sempre nell'ordine dei mW per ognuna delle soluzioni adottate andando a sviluppare però una scarica più uniforme e stabile quando il sistema è accoppiato con l'AlmaPULSE.

### **3.3 SVILUPPI FUTURI**

Nella parte finale della mia esperienza di laboratorio si è voluto esplorare anche il futuro, ipotizzando e realizzando un prototipo che si avvicini ad una configurazione che potrebbe rappresentare la sorgente (o più di una) quando il progetto raggiungerà gli stadi conclusivi. Un'idea proposta è riportata in figura 3.35 dove è presente un prototipo multicanale all'interno dei quali si sviluppano le scariche plasma. Il sistema è costituito da un rettangolo in plexiglass 120x100x16 mm al cui interno sono presenti 25 canalini, distanziati tra loro di 2 mm, le cui dimensioni sono 2x2x2 mm; è presente anche un canale centrale passante, dal diametro di 2,50 mm, per l'inserimento del raccordo che consente il collegamento della pompa. Il collegamento elettrico è garantito grazie ad elettrodi metallici, mostrati in figura 3.36, che si innestano all'interno dei canali attraverso piolini modulabili per variare la distanza interelettrodica da 100 a 25 mm, come avveniva nelle sorgenti precedentemente studiate.



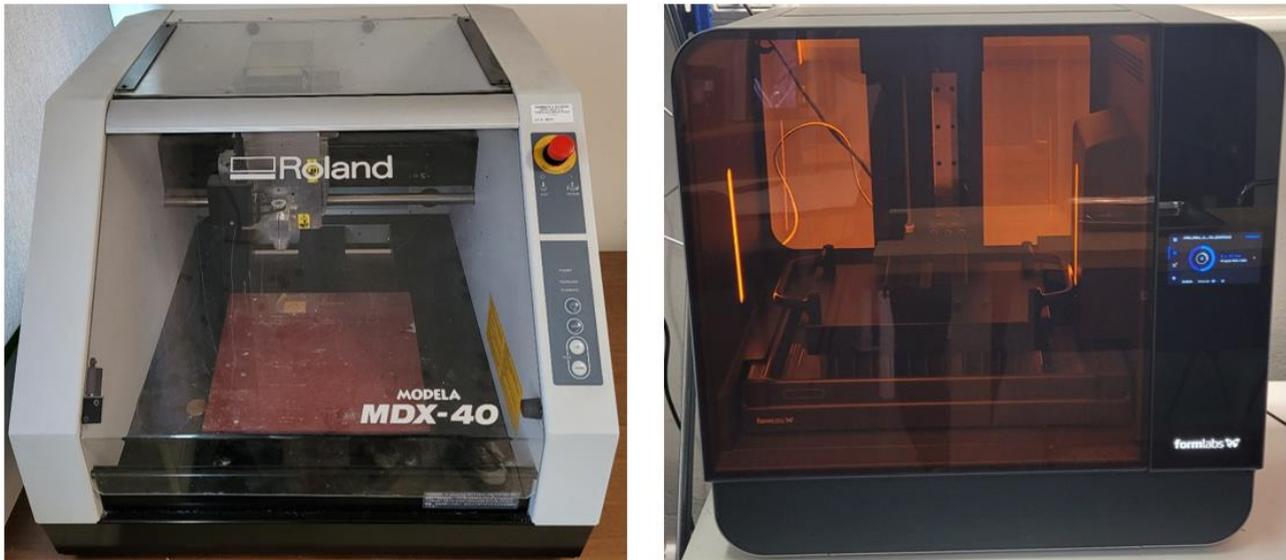
*Figura 3.35: Rendering del prototipo realizzato con la stampante 3D*



*Figura 3.36: Rendering dell'elettrodo in metallo*

Per la realizzazione sono state investigate due strade: la prima prevede l'utilizzo di una microfresa, resa disponibile dal dipartimento di fisica tecnica dell'università di Bologna, mentre la seconda della Formlab 3L, una stampante 3D presa in prestito da Almalabor, struttura sempre facente parte dell'università. Entrambe le soluzioni sono mostrate nelle foto riportate in figura 3.37. La strada della microfresa è stata accantonata in seguito ai vari test svolti facendo lavorare lo strumento alle sue condizioni di progetto, ovvero tra i 9000 e i 10000 rpm con una velocità di movimento del mandrino di 360 mm/min su cui è inserita una fresa testa piatta da 1 mm di diametro. L'abbandono di questa soluzione operativa è avvenuto in quanto il tempo di produzione di un oggetto con il numero di canali richiesto è stato appurato essere eccessivamente elevato. Rimarrebbe inoltre in sospeso la problematica della chiusura della sorgente, che verrebbe risolta con la creazione di un "coperchio", in plexiglass anch'esso, per chiudere le due parti incollandole, quella superiore e quella inferiore, tramite cloroformio. Risulta evidente come questa procedura sia soggetta a vari ed imprevedibili errori di natura umana e no, garantendo un risultato insoddisfacente in termini, ad esempio, di tenuta

alle basse pressioni che si vogliono raggiungere. L'utilizzo della stampante 3D risolve molte problematiche: tempi molto più rapidi di produzione, passando da qualche giorno a qualche ora, sprechi di materiale ridotti, la possibilità fondamentale di poter realizzare un pezzo unico risolvendo la tematica del coperchio prima citata. Il prototipo, con questa procedura, risulta però realizzato in resina e dev'essere quindi verificata la tenuta alle basse pressioni di questo materiale.



*Figura 3.37: Foto raffiguranti la microfresa a sinistra e la stampante 3D a destra*

La sorgente realizzata con questa modalità dovrà essere testata non solo dal punto di vista strutturale, ma dovrà essere soggetta ad una caratterizzazione elettrica in un set-up diverso rispetto a quello usato per i prototipi presentati in questo elaborato. Il gruppo di ricerca mira, infatti, ad ottenere una camera per il vuoto in cui poter compiere test più sofisticati sottoponendo la sorgente plasma a condizioni di pressioni più estreme, spingendosi, come da obiettivo del progetto, fino a 0,1 mbar. Per compiere ciò sarà necessario servirsi di una pompa molto più performante di quella utilizzata in questo lavoro di tesi, potendo di conseguenza esplorare con risultati soddisfacenti anche distanze interelettrode maggiori di quelle studiate arrivando fino a 10 cm, come richiesto dagli obiettivi di PULSE. Oltre a ciò, sarà necessario studiare la densità elettronica della sorgente, rendere elettricamente indipendenti tra loro tutti i canali in cui il plasma si genera, per scegliere arbitrariamente in quali sviluppare la scarica e in quali no, studiando l'interferenza che esercitano gli uni sugli altri, il tutto per creare un metamateriale integrato con plasma di cui si conosca il comportamento sotto ogni aspetto.

## 4.CONCLUSIONI

Il mondo dei metamateriali cambierà molti aspetti della società in un futuro non necessariamente distante, in particolare andrà a colpire la sfera delle comunicazioni, migliorandone le qualità per la capacità di interfacciarsi in maniera elastica con le onde elettromagnetiche. In quest'ottica il connubio con il plasma risulta essere estremamente positivo per creare “meta dispositivi”, o metasuperfici, riconfigurabili a piacimento a seconda delle esigenze, creando una tecnologia del tutto nuova ed estremamente flessibile che può interfacciarsi con molti ambiti, dalle comunicazioni all'aeronautica, dal settore militare a quello civile e così via. Il lavoro svolto e mostrato è il primo tassello di un progetto che punta a tutto ciò per ottenere un impatto, oltre che sociale, anche economico estremamente rilevante sfruttando le funzionalità senza precedenti di questo nuovo orizzonte tecnologico. Questi primi passi hanno aperto infatti la strada ad applicazioni, oltre che nelle telecomunicazioni, nel settore aeronautico militare per via delle pressioni in gioco che è stato possibile raggiungere nei vari esperimenti eseguiti. Alla luce di tutto ciò che è stato detto e trattato, il percorso risulta ancora agli inizi e PULSE si è dimostrato essere una sfida ambiziosa a causa delle competenze interdisciplinari che la caratterizzano e che bisogna possedere per spingersi a condizioni di lavoro più estreme, per quanto riguarda soprattutto i valori di pressione, per osservare risultati sempre più in linea con le volontà del progetto, necessitando dell'aiuto e delle competenze di tutti i soggetti che sono coinvolti in questa esperienza.

## 5.BIBLIOGRAFIA

- [1]. <https://www.pulse-pathfinder.eu>.
- [2]. R.M. Walser, in: W.S. Weiglhofer and A. Lakhtakia (Eds.), *Introduction to Complex Mediums for Electromagnetics and Optics*, SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2003.
- [3]. Walser, R.M. (2001) *Electromagnetic metamaterials*, Inaugural Lecture, Proc. of SPIE (Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics; Lakhtakia, A, Weiglhofer, W.S., and Hodgkinson, I.J. editors), 4467, 1--15.
- [4] A. Sihvola, *Electromagnetic emergence in metamaterials*, in: S. Zouhdi, A. Sihvola, M. Arsalane (Eds.), in: *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials*, vol. 89, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, pp. 1–17 (NATO Science Series II: Mathematics, Physics, and Chemistry).
- [5]. A. Sihvola, *Metamaterials in electromagnetics*, *Metamaterials 1* (2007) 2–11.
- [6]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>.
- [7]. [https://www.treccani.it/enciclopedia/metamateriali\\_%28XXI-Secolo%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/metamateriali_%28XXI-Secolo%29/).
- [8]. *Tecnologia per rivelatori Cherenkov miniaturizzati*, in *inaf.it*, 7 gennaio 2022.
- [9]. *IRE Proc.*, 34 November 1946, pp. 828-836.
- [10]. *Bell. Sys. Tech. Jour.*, 27, January 1948, pp. 58-82.
- [11]. *Metamaterial Britannia Royal Navy College – Physics World*.
- [12]. G.V. Eleftheriades, A.K. Iyer and P.C. Kremer, *Planar Negative Refractive Index Media Using Periodically L-C Loaded Transmission Lines*, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 50, no. 12, pp. 2702-2712 (2002).
- [13]. C. Caloz and T. Itoh, *Application of the Transmission Line Theory of Left-handed (LH) Materials to the Realization of a Microstrip 'LH line'*, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2, 412-415 (2002) (DOI: 10.1109/APS.2002.1016111).
- [14]. <http://www.cnn.com/2006/TECH/05/25/invisibility.cloak.ap/index.html>.
- [15]. *'Cloaking device' idea proposed*, in *BBC News*, 3 Maggio 2006.
- [16]. *Plan for cloaking device unveiled*, in *BBC News*, 25 Maggio 2006.
- [17]. *Scientists shed new light on invisibility* at [www.boston.com](http://www.boston.com).
- [18]. *Experts test cloaking technology*, in *BBC News*, 19 Ottobre 2006.
- [19]. *Engineers see progress in creating 'invisibility cloak'* at [www.purdue.edu](http://www.purdue.edu).
- [20]. *News Releases, Feature Stories and Profiles about Duke University's Pratt School of Engineering*.
- [21]. Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P. *et al.* A seismic metamaterial: The resonant meta wedge. *Sci Rep* 6, 27717 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep27717>.
- [22]. Gupta, A., Sharma, R., Thakur, A. *et al.* Metamaterial foundation for seismic wave attenuation for low and wide frequency band. *Sci Rep* 13, 2293 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27678-1>.

- [23]. Veselago VG, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$* , in *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, n. 4, 1968, pp. 509–14, DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
- [24]. Veselago VG, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$* , in *Usp. Fiz. Nauk*, vol. 92, 1967, pp. 517–526.
- [25]. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.-S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, and S. Tretyakov, “Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450–2525, 2020.
- [26]. Metasurfaces 3.0: a New Paradigm for Enabling Smart Electromagnetic Environments”: Mirko Barbuto, Zahra Hamzavi-Zarghani, Michela Longhi, Alessio Monti, Davide Ramaccia, Stefano Vellucci, Alessandro Toscano, Filiberto Bilotti (IEEE, 2021).
- [27]. Wu and A. Grbic, “Serrodyne frequency translation using time-modulated metasurfaces”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1599–1606, 2019.
- [28]. D. Ramaccia, D. L. Sounas, A. Alu, A. Toscano, and F. Bilotti, “Phase-induced frequency conversion and doppler effect with time-modulated metasurfaces”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1607–1617, 2019.
- [29]. D. Ramaccia, D. Sounas, A. Alu, A. Toscano, and F. Bilotti, “Metasurface-based radar jammers and deceptors implemented through time-varying metasurfaces”, in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–2, IEEE, 2020.
- [30]. X. Wang and C. Caloz, “Spread-spectrum selective camouflaging based on time-modulated metasurface”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020.
- [31]. “Nonlinear Mantle Cloaking Devices for Power-Dependent Antenna Arrays”: Alessio Monti, Mirko Barbuto, Alessandro Toscano, Filiberto Bilotti (IEEE, 2017).
- [32]. D. Dardari and N. Decarli, “Holographic communication using intelligent surfaces”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 35–41, 2021.
- [33] D. Dardari, “Communicating with large intelligent surfaces: Fundamental limits and models”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2526–2537, 2020.
- [34] D. Dardari and D. Massari, “Using meta prisms for performance improvement in wireless communications”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 5, pp. 3295–3307, 2021.
- [35] F. Guidi and D. Dardari, “Radio positioning with e.m. processing of the spherical wavefront”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 3571–3586, 2021.
- [36] H. Zhang, N. Shlezinger, F. Guidi, D. Dardari, M. F. Imani, and Y. C. Eldar, “Beam Focusing for Near-Field Multi-User MIMO Communications”, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2105.13087, May 2021.
- [37] A. Elzanaty, A. Guerra, F. Guidi, D. Dardari, and M.-S. Alouini, “Towards 6G Holographic Localization: Enabling Technologies and Perspectives”, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2103.12415, Mar. 2021.
- [38] J. Roberts, K. L. Ford, and J. M. Rigelsford, “Secure electromagnetic buildings using slow phase-switching frequency-selective surfaces”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 1, pp. 251–261, 2015.

- [39]. S. N. Tsvetkova, V. S. Asadchy, and S. A. Tretyakov, "Scanning characteristics of metamirror antennas with subwavelength focal distance", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 8, pp. 3656–3660, 2016.
- [40]. J. Cui, S. Liu, G. D. Bai, and Q. Ma, "Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface", *Research*, vol. 2019, 2019.
- [41]. Kim & Jeffrey Hopwood, *Wave Propagation in Composites of Plasma and Metamaterials with Negative Permittivity and Permeability* Hyunjun, <http://doi.org/10.1038/s41598-019-39923-7>.
- [42]. Osamu Sakai and Kunihide Tachibana 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* 21 013001.
- [43]. Tachibana K, Kishimoto Y, Kawai S, Sakaguchi T and Sakai O 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion*.
- [44]. Ito Y, Sakai O and Tachibana K 2010 *Plasma Sources Sci. Technol.* 19 025006.
- [45]. Shashurin A, Shneider M N, Dogariu A, Miles R B and Keidar M 2010 *Appl. Phys. Lett.* 96 171502.
- [46]. Sakaguchi T, Sakai O and Tachibana K 2007 *J. Appl. Phys.* 87 073305.
- [47]. Sakai O, Naito T and Tachibana K 2010 *Phys. Plasmas* 17 057102.
- [48]. Chenhui Qu et al 2017 *Plasma. Sources Sci. Technol.* 26 105006.
- [49]. Y. Ra'di, D. Sounas, and A. Alù, "Metagratings: Beyond the limits of graded metasurfaces for wave front control", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, 067404, 2017.
- [50]. I. Alexeff et al., "Experimental and theoretical results with plasma antennas", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 34, no. 2, pp. 166-172, 2006.
- [51]. D. Melazzi et al., "Analytical and Numerical Study of a Gaseous Plasma Dipole in the UHF Frequency Band", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, 2017.
- [52]. D Da-Jin Kim, et al, "A frequency reconfigurable dipole antenna with solid-state plasma in silicon", *Sci. Rep.*, vol. 8, 14996, 2018.
- [53]. P. De Carlo et al., "Experimental Characterization of a Plasma Dipole in the UHF Band", *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 20, 1621, 2021.
- [54]. G. Mansutti et al., "Design of a Hybrid Metal-Plasma Transmit-Array with Beam-Scanning Capabilities", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 50, 662, 2022.

## 6.APPENDICE

Di seguito sono mostrate le tabelle in cui si riportano le medie dei risultati ottenuti dalle prove eseguite durante tutte le caratterizzazioni elettriche svolte.

Tabella 6.1: Condizioni operative esplorate usando l'Amazing One

Tensione (kV)	Tensione massima (kV)	Corrente massima (A)	Potenza media (W)	Potenza media su periodo (W)	gas	pressione (bar)	distanza interelettrodica (mm)	Frequenza (kHz)
5	7,07±0,31	0,016±0,005	0,168±0,093	0,187±0,089	aria	0,3	25	20
6	8,48±0,14	0,017±0,006	0,286±0,012	0,223±0,010	aria	0,3	25	20
7	9,33±0,23	0,025±0,013	0,417±0,071	0,584±0,019	aria	0,3	25	20
6	8,32±0,16	0,009±0,001	0,255±0,013	0,240±0,051	aria	0,3	50	20
9	11,01±0,24	0,012±0,004	0,458±0,072	0,358±0,070	aria	0,3	50	20
11	13,67±0,11	0,018±0,012	0,603±0,056	0,681±0,077	aria	0,3	50	20
4	6,24±0,29	0,014±0,004	0,193±0,015	0,276±0,087	argon	0,5	25	20
6	8,43±0,09	0,025±0,003	0,347±0,101	0,315±0,066	argon	0,5	25	20
8	10,04±0,53	0,037±0,002	0,476±0,099	0,355±0,028	argon	0,5	25	20
5	7,30±0,03	0,0068±0,0004	0,093±0,014	0,101±0,028	argon	0,5	50	20
8	11,20±0,40	0,008±0,001	0,431±0,035	0,368±0,023	argon	0,5	50	20
11	12,8±1,7	0,020±0,001	0,689±0,031	0,795±0,038	argon	0,5	50	20

Tabella 6.2: Condizioni operative esplorate usando l'Amazing One con le resistenze

Tensione (kV)	Tensione massima (kV)	Corrente massima (A)	Potenza media (W)	Potenza media su periodo (W)	gas	pressione (bar)	distanza interelettrodica (mm)	Frequenza (kHz)
5	7,50±0,04	0,0019±0,0006	0,034±0,001	0,102±0,014	argon	0,5	25	20
7	9,52±0,36	0,0049±0,0004	0,079±0,011	0,179±0,007	argon	0,5	25	20
9	11,40±0,15	0,0088±0,0012	0,141±0,016	0,325±0,049	argon	0,5	25	20
11	13,01±0,17	0,063±0,005	0,227±0,004	0,469±0,068	argon	0,5	25	20
12	14,12±0,22	0,073±0,005	0,501±0,012	0,670±0,060	argon	0,5	25	20
7	9,53±0,14	0,005±0,002	0,052±0,004	0,043±0,004	argon	0,5	50	20
9	10,91±0,28	0,0054±0,0009	0,059±0,036	0,074±0,023	argon	0,5	50	20
11	12,18±0,11	0,035±0,001	0,187±0,007	0,253±0,023	argon	0,5	50	20
12	14,43±0,38	0,048±0,002	0,430±0,015	0,584±0,091	argon	0,5	50	20
13	15,22±0,30	0,049±0,003	0,518±0,064	0,604±0,016	argon	0,5	50	20

Tabella 6.2: Condizioni operative esplorate usando l'AlmaPULSE con le resistenze

Tensione (kV)	Tensione massima (kV)	Corrente massima (A)	Potenza media (W)	Potenza media su periodo (W)	gas	pressione (bar)	distanza interelettrodica (mm)	Frequenza (kHz)
11,2	9,50±0,15	0,0105±0,0066	0,031±0,005	0,0376±0,0019	argon	0,5	25	1
11,4	11,01±0,06	0,039±0,022	0,062±0,026	0,0523±0,0036	argon	0,5	25	1
11,6	11,93±0,07	0,0788±0,0013	0,131±0,019	0,101±0,040	argon	0,5	25	1
11,8	12,81±0,06	0,115±0,012	0,186±0,054	0,171±0,089	argon	0,5	25	1
12	13,40±0,04	0,132±0,023	0,244±0,003	0,182±0,016	argon	0,5	25	1
12,2	13,94±0,08	0,131±0,023	0,249±0,043	0,259±0,016	argon	0,5	25	1
12,4	14,39±0,06	0,146±0,040	0,314±0,018	0,316±0,036	argon	0,5	25	1
12,6	14,69±0,05	0,134±0,028	0,379±0,026	0,408±0,070	argon	0,5	25	1
12,8	15,10±0,12	0,171±0,008	0,518±0,019	0,497±0,041	argon	0,5	25	1
13	15,42±0,09	0,172±0,028	0,567±0,079	0,583±0,063	argon	0,5	25	1
13,5	16,17±0,08	0,141±0,013	0,544±0,021	0,557±0,008	argon	0,5	25	1
14	16,78±0,19	0,172±0,020	0,669±0,011	0,694±0,039	argon	0,5	25	1
11,2	8,97±0,17	0,0083±0,0027	0,017±0,002	0,053±0,007	argon	0,5	25	5
11,4	11,18±0,12	0,0282±0,0019	0,084±0,010	0,076±0,006	argon	0,5	25	5
11,6	12,53±0,04	0,054±0,003	0,146±0,043	0,135±0,027	argon	0,5	25	5
11,8	11,41±0,92	0,057±0,017	0,169±0,013	0,208±0,012	argon	0,5	25	5
12	13,25±0,12	0,076±0,003	0,271±0,026	0,294±0,050	argon	0,5	25	5
12,2	14,69±0,03	0,165±0,011	0,597±0,033	0,659±0,003	argon	0,5	25	5
12,3	14,92±0,02	0,167±0,008	0,756±0,089	0,722±0,035	argon	0,5	25	5
12,5	15,33±0,05	0,131±0,015	0,899±0,028	0,873±0,031	argon	0,5	25	5
12,7	15,61±0,01	0,148±0,006	1,023±0,021	1,110±0,055	argon	0,5	25	5
13	16,28±0,08	0,132±0,020	1,225±0,108	1,341±0,083	argon	0,5	25	5
12,5	14,95±0,06	0,0007±0,00006	0,021±0,005	0,032±0,011	argon	0,5	50	1
13	15,91±0,01	0,0023±0,0001	0,0394±0,0008	0,044±0,006	argon	0,5	50	1
13,5	16,67±0,02	0,029±0,008	0,056±0,019	0,061±0,006	argon	0,5	50	1
14	17,31±0,03	0,024±0,006	0,071±0,023	0,087±0,008	argon	0,5	50	1
15	18,55±0,02	0,027±0,011	0,092±0,007	0,104±0,005	argon	0,5	50	1
12,5	15,57±0,07	0,013±0,002	0,056±0,008	0,049±0,009	argon	0,5	50	5
13	16,59±0,08	0,017±0,003	0,073±0,007	0,077±0,008	argon	0,5	50	5
14	18,14±0,09	0,0161±0,0007	0,082±0,001	0,093±0,005	argon	0,5	50	5
15	19,30±0,01	0,014±0,001	0,104±0,006	0,106±0,002	argon	0,5	50	5
16	20,70±0,08	0,013±0,003	0,1177±0,0006	0,112±0,007	argon	0,5	50	5