



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## **Facoltà di Ingegneria**

**Dottorato di Ricerca in Modelli Matematici per l'Ingegneria,  
Elettromagnetismo e Nanoscienze**

**Curriculum: Elettromagnetismo XXIX Ciclo**

# **PROGETTAZIONE DI ASSORBITORI METAMATERIALI NELLE MICROONDE**

**DOCENTI GUIDA:**

**Prof. Fabrizio Frezza**

**Dott. Ing. Nicola Tedeschi**

**CANDIDATO:**

**Emiliano Sassolini**

## INDICE

INDICE .....	2
SOMMARIO DELLA TESI .....	4
INTRODUZIONE .....	7
I). Topic e definizione degli obiettivi della tesi.....	7
II). Approccio metodologico seguito.....	8
III). Il software di simulazione: Comsol Multiphysics 4.4. ....	10
1. METAMATERIALI E ASSORBITORI .....	13
1.1 Introduzione ai metamateriali.....	13
1.2 Storia dei metamateriali .....	14
1.3 Metamateriali elettromagnetici .....	15
1.4 Classificazione dei metamateriali e indice di rifrazione negativo.....	16
1.5 Assorbitori metamateriali: generalità.....	20
1.6 I precursori degli assorbitori metamateriali: lo schermo di Salisbury e lo stato di Dallenbach .....	22
1.7 Assorbitori risonanti e a larga banda (broadband).....	25
1.8 Gli assorbitori a metamateriali PMA.....	29
1.9 Elementi di Fisica degli assorbitori .....	34
1.10 Il ruolo delle perdite e dello spessore.....	41
2 L'ASSORBITORE DI LANDY .....	43
2.1 Struttura dell' assorbitore di Landy .....	43
2.2 Risposta in polarizzazione TE.....	45
2.3 Risposta in polarizzazione TM .....	50
3. IL WIDE ANGLE METAMATERIAL ABSORBER .....	52
3.1 Premessa .....	52
3.2 Struttura del wide angle absorber.....	52
3.3 Comportamento del wide angle absorber in polarizzazione TE.....	55
3.4 Comportamento del wide angle absorber in polarizzazione TM .....	58
3.5 Il problema della disponibilità dei materiali.....	60
4. LE POSSIBILI SOLUZIONI: IL MODELLO A SVASTICA .....	63
4.1 premessa .....	63
4.2 Struttura dello swastiska absorber-caso cella primitiva a base rettangolare .....	64
4.3 Comportamento in polarizzazione TE.....	66

4.4 Comportamento in polarizzazione TM .....	69
4.5 Struttura dello swastiska absorber-caso cella primitiva a base quadrata .....	71
4.6 . Caso polarizzazione TE. ....	75
4.7 Caso polarizzazione TM.....	77
CAPITOLO 5: IL DISPOSITIVO PMA ELABORATO CON IL GRUPPO DI RICERCA PER LE MISURE.....	81
5.1 Struttura realizzata in collaborazione con il gruppo di Ricerca .....	81
5.2 Realizzazione della struttura realizzata in collaborazione con il gruppo di Ricerca .....	83
5.3 Set up di misura .....	85
5.4 Misure in banda X sul campione.....	86
.....	87
5.5 Confronto misure e simulazioni numeriche .....	89
6. MISURE RIFLETTIVITA' DI ASSORBITORI PER MICROONDE ED ONDE MILLIMETRICHE PRESSO IFP- CNR DI MILANO .....	93
6.1 Tratti generali .....	93
6.2 Descrizione generale dell'attività .....	93
6.3 Le bande di frequenza coinvolte .....	94
6.4 Le misure sui campioni: generalità .....	94
6.5 Sistema di misura.....	95
6.6 Tecnica di calibrazione .....	95
CONCLUSIONI.....	97
BIBLIOGRAFIA.....	99

## SOMMARIO DELLA TESI

Il seguente lavoro di tesi riporta i risultati del progetto di ricerca svolto durante il percorso di Dottorato in Elettromagnetismo. Il tema del Dottorato ha avuto come soggetto gli assorbitori perfetti metamateriali (PMA, Perfect Metamaterial Absorber) ed il target del percorso triennale è stato lo studio e la progettazione di nuove strutture assorbenti basate sempre su tale tecnologia che presentassero ottime prestazioni in termini di assorbimento così da poter rientrare nella categoria. Gli assorbitori progettati funzionano nella banda X delle microonde. La logica del percorso seguito nella dissertazione è stata così articolata;

**Introduzione.** Prima dell'inizio del corpo vero e proprio della tesi è stato elaborato un breve capitolo di introduzione in cui si è introdotto l'argomento del triennio di Dottorato ed il metodo di studio e analisi seguiti. Tale capitolo è stato suddiviso in tre paragrafi che hanno la funzione di presentare a chi legge l'argomento trattato (gli assorbitori PMA), il percorso generale, la definizione degli obiettivi della ricerca, l'approccio metodologico seguito ed applicato durante il triennio ed infine una breve descrizione del software di simulazione Comsol Multiphysics utilizzato per le simulazioni numeriche.

**CAPITOLO 1.** È il capitolo dove si contestualizza l'argomento della tesi: gli assorbitori metamateriali (PMA). È una sezione della dissertazione dove viene ripercorsa la storia dei metamateriali e descritte le loro principali proprietà peculiari. L'attenzione si focalizza gradualmente sugli assorbitori metamateriali oggetto di studio del dottorato; viene presentata la loro origine, dai dispositivi precursori come lo schermo di Salisbury fino allo stato dell'arte attuale, a come vengono realizzati, quali sono le tipologie più diffuse fino ad illustrare quali possono essere le potenziali applicazioni in ambito ingegneristico, energetico e strategico. Infine vengono spiegati brevemente i punti salienti della fisica degli assorbitori che sono alla base del loro stesso funzionamento, ponendo enfasi sulle condizioni che generano la risonanza d'assorbimento e sul ruolo delle perdite dielettriche.

**CAPITOLO 2.** In questo capitolo è stata approfondita la conoscenza dell'assorbitore di Landy. Tale dispositivo consta di uno slab dielettrico in FR4 con perdite. Sulle due superfici opposte dello slab sono depositate delle inclusioni metalliche in rame. Sulla superficie top, quella in cui per prima giunge la radiazione incidente, è presente un risonatore quadrato ad anello aperto (SSRR, Split Square Ring Resonator), mentre su quella opposta dove fuoriesce l'onda trasmessa è presente una strip metallica. La struttura e le condizioni al contorno di tale dispositivo sono state riprodotte in ambiente Comsol Multiphysics, il software di simulazione utilizzato durante tutto il lavoro di

ricerca. In questo modo si sono riprodotti i risultati riportati in letteratura legati a tale dispositivo e si è potuto avere un modello di partenza su cui poi sviluppare il lavoro. Il dispositivo di Landy è un assorbitore perfetto in una singola polarizzazione lineare TE (piano di incidenza yz) per piccoli valori dell'angolo di incidenza e per una ristretta frequenza di lavoro che ricade nella banda X delle microonde. Allontanandosi da tali condizioni le prestazioni calano rapidamente.

**CAPITOLO 3.** In questa parte della tesi sono riportati i principali risultati ottenuti durante il triennio. A partire dal modello dell'assorbitore di Landy i principali sforzi si sono concentrati nell'individuazione di una struttura che ottimizzasse l'assorbimento, mantenendo al contempo una semplicità realizzativa. Sono stati compiuti numerosi test agendo sulla geometria delle inclusioni metalliche, sul numero degli strati, sul tipo di polarizzazione dell'onda incidente. Alla fine i migliori risultati si sono ottenuti assottigliando la larghezza del risonatore quadrato, ruotandolo di 90 gradi rispetto alla configurazione di Landy e sostituendo la strip metallica con un piatto metallico. In tal modo si è ottenuto un nuovo dispositivo wide angular absorber che manifesta un elevato assorbimento anche in condizioni di incidenza obliqua per grandi angoli, sempre in banda X. Tale ottima prestazione si limita però alla polarizzazione TE (piano di incidenza yz) e per ristretti valori in frequenza. Le dimensioni dell'assorbitore sono state adattate in base alle esigenze commerciali in relazione alla reperibilità dei materiali disponibili così da poter realizzare il dispositivo e sottoporlo a misure sul campo. Nel corso di tale fase del Dottorato è stato necessario riprogettare il dispositivo così da poter avere una struttura funzionante e realizzabile sulla base dei materiali disponibili commercialmente. La nuova forma è stata elaborata in collaborazione con il gruppo di ricerca. Minore fortuna ha invece avuto la ricerca di un modello circuitale volto ad ottenere una formalizzazione della relazione tra parametri geometrici delle inclusioni metalliche e risonanze osservate.

**CAPITOLO 4.** Questa sezione della tesi descrive un'ulteriore evoluzione del wide angular absorber nel tentativo di incrementare ulteriormente le prestazioni in termini di assorbimento. Come nello step precedente dopo alcuni tentativi, la sostituzione del risonatore quadrato con delle inclusioni metalliche a forma di svastica ha condotto ad un miglioramento dell'assorbimento. Facendo ricorso ad una geometria quadrata della cella primitiva con inclusioni metalliche a svastica sul lato della superficie ove arriva la radiazione è stato possibile ottenere un nuovo dispositivo wide angular absorber insensibile rispetto al tipo di polarizzazione lineare usata (piano di incidenza yz). Tale progresso in termini di assorbimento è ascrivibile all'aumentata simmetria del sistema nello spazio. La percentuale di assorbimento ottenuta si mantiene elevata anche utilizzando i parametri dei materiali commercialmente disponibili che precedentemente avevano abbattuto il rendimento del wide angular absorber basato sul risonatore quadrato.

**CAPITOLO 5.** In tale capitolo è stata introdotta un'ulteriore struttura progettata in collaborazione con il gruppo di ricerca che fornisce una buona risposta angolare in termini di assorbanza in polarizzazione TE. Tale struttura è stata poi costruita fisicamente e il pannello così ottenuto è stato sottoposto a misura presso il CNR-IFP di Milano. I primi risultati delle misure, tuttora in corso, in condizioni di incidenza normale e configurazione monostatica hanno dato buone conferme per quel che concerne l'entità dell'assorbimento in polarizzazione TE. Occorreranno ulteriori approfondimenti per dettagliare maggiormente i risultati.

**CAPITOLO 6.** In questo capitolo viene brevemente descritta l'esperienza lavorativa, tuttora in corso che sto svolgendo presso il CNR-IFP di Milano come assegnista da Gennaio 2016. Tale attività, sebbene indipendente dal percorso di Dottorato, può essere considerata un completamento pratico dello stesso. Il target del lavoro consiste in misure di riflettività di campioni di prova per il calibratore di un radiometro che troverà poi impiego su un satellite destinato a svolgere misurazioni in campo ambientale. Questo tipo di attività si articola sia in mansioni di laboratorio finalizzate allo svolgimento delle misure di riflettività dei campioni di prova e in una fase di elaborazione e pulizia dei dati mediante opportuni programmi così da poter arrivare ad una stima buona del risultato cercato.

**CONCLUSIONI** in questo lavoro di tesi che riporta quanto svolto nel triennio di ricerca, partendo da un assorbitore le cui funzionalità siano note a priori sulla base della letteratura scientifica si è ottenuto un nuovo assorbitore che con poche modifiche rispetto al dispositivo originario ha permesso un netto miglioramento delle prestazioni in termini di assorbimento angolare. Tale struttura è stata poi nuovamente ridisegnata in equipe in modo da poter ottenere un dispositivo realizzabile in relazione alle disponibilità commerciali dei materiali necessari. Le misure su tale assorbitore già iniziate saranno completate nelle prossime settimane. Nell'ultimo anno di Dottorato è stato implementato un altro assorbitore a forma di svastica che presenta un assorbimento per grandi angoli e per ambo le polarizzazioni anche utilizzando i parametri dielettrici dei materiali reperibili che in precedenza avevano abbattuto la percentuale d'assorbimento nel wide angular absorber presentato nel capitolo tre. La modellizzazione circuitale delle strutture qui presentate richiederà invece ulteriori approfondimenti.

## INTRODUZIONE

### I). Topic e definizione degli obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi riporta il percorso ed i risultati ottenuti durante il lavoro di ricerca svolto nel triennio di Dottorato 2013-2016 all'interno del Curriculum di Elettromagnetismo. La tematica oggetto di studio durante tale arco temporale sono stati gli assorbitori perfetti metamateriali (PMA, Perfect Metamaterial Absorber) nella banda delle microonde. Come è noto la tecnologia dei metamateriali è relativamente recente dal punto di vista della loro realizzazione ma a livello teorico la possibilità di fabbricare materiali che manifestassero proprietà ottiche peculiari era già stata prevista dal fisico russo Victor Veselago nel 1968<sup>1</sup>.

Durante il percorso di Dottorato si sono approfonditi il funzionamento e le prestazioni di un assorbitore perfetto realizzato da Landy<sup>2</sup>, costituito da un risonatore quadrato (split square resonator) e da una strip metallica inseriti all'interno di uno slab dielettrico. Sulla base degli studi presenti nella letteratura scientifica dell'argomento, sono state implementate delle modifiche volte ad ottimizzare le prestazioni di tale dispositivo.

Uno dei problemi con cui ci si scontra nel caso degli assorbitori perfetti metamateriali è la grande limitatezza del loro range di funzionalità: a fronte di elevate percentuali di assorbimento, tale comportamento è spesso riscontrabile solo per ristretti range di frequenza ed angoli. La maggior parte del lavoro di ricerca svolto durante il dottorato è andato proprio in questa direzione: l'individuazione di una configurazione ottimale finalizzata al miglioramento della risposta dell'assorbitore metamateriale. Le simulazioni numeriche sono state svolte su software di simulazione elettromagnetica Comsol Multiphysics.

Basandosi sulla letteratura scientifica si è agito modificando le dimensioni e la forma delle inclusioni metalliche o variando lo spessore dello slab dielettrico in modo da cambiare le capacità e le induttanze equivalenti così da poter agire sulla frequenza di lavoro, dove si evidenzia il massimo assorbimento<sup>3,4,5</sup>. Altro problema di natura logistica affrontato nel corso dell'ottimizzazione è stato il cercare di migliorare i risultati senza però complicare la struttura dell'assorbitore metamateriale; prove sono state svolte anche modificando la polarizzazione della

radiazione incidente. I migliori risultati si sono ottenuti assottigliando le inclusioni metalliche e ruotando il risonatore di 90 gradi. Il risultato più rilevante ha riguardato l'allargamento dell'assorbimento angolare. Da una configurazione perfettamente assorbente solamente in incidenza normale e per piccoli angoli si è passati ad un assorbimento angolare che seguita ad essere buono fino all' 80% a 68.5 °.

I tentativi di rendere insensibile al tipo di polarizzazione il comportamento del nuovo dispositivo non hanno avuto successo in una prima fase. Per ottenere tale risultato è stato necessario agire ancor più sulla geometria nel piano top, abbandonando la struttura del risonatore quadrato per arrivare a quella a svastica, elaborata negli ultimi mesi, che mostra ottime prestazioni in ambo i modi di polarizzazione lineare (rispetto al piano yz) anche utilizzando dielettrici con basso valore di perdita. Non si è invece riuscita ad allargare la banda di assorbimento in frequenza.

Ardua si è rivelata anche la modellizzazione matematico-circuitale del sistema che avrebbe fornito una spiegazione più formale e completa dei risultati ottenuti ed al contempo dato un' indicazione più puntuale su come modificare i parametri di controllo.

Infine, per motivi legati alle specifiche dielettriche dei materiali disponibili, in collaborazione con il gruppo di ricerca, è stata progettata una terza struttura che poi è stata realizzata fisicamente e che attualmente è in fase di test di misura. I primi risultati in incidenza normale hanno fornito indicazioni incoraggianti.

## **II). Approccio metodologico seguito**

Prima di proseguire entrando nel dettaglio della tesi, viene qui specificato l'approccio ed il metodo seguiti per svolgere il lavoro del triennio di Dottorato. Durante il periodo iniziale di inquadramento dell'argomento o anche nelle fasi in cui si sono presentati degli elementi nuovi da approfondire, l'attenzione si è concentrata sui lavori documentati già presenti nella letteratura scientifica riguardante l'argomento. Il primo passo è stata la comprensione dello stato dell'arte attuale della ricerca concernente gli assorbitori perfetti a metamateriale (perfect metamaterial absorber, PMA) tenendo conto delle varie tipologie, della fisica di tali sistemi e delle possibili applicazioni. L'attenzione si è poi progressivamente focalizzata sugli assorbitori risonanti basati su inclusioni

metalliche depositate sulle superfici di slab dielettrici. È in tal modo infatti che si possono ottenere notevoli prestazioni in termini di assorbimento costruendo dei dispositivi relativamente piccoli e versatili. Essendo poi l'obiettivo della tesi l'ottenimento di una struttura assorbente metamateriale dalle ottime prestazioni come PMA e dalla geometria relativamente semplice si è preso in considerazione un assorbitore già noto come punto di partenza di molti assorbitori metamateriali: l'assorbitore di Landy, Padilla et al (2008)<sup>2</sup>.

Trattasi questo di un assorbitore MTM (metamateriale) costituito da uno slab dielettrico in FR4 con depositate delle inclusioni metalliche in rame sulle due superfici all'estremità top e bottom (top superficie d'arrivo della radiazione incidente, bottom superficie d'uscita della radiazione trasmessa). Nella superficie top è presente un risonatore quadrato ad anello aperto (split square resonator ring, SSRR), mentre sulla superficie opposta una strip metallica. Tale dispositivo lavora come assorbitore per un preciso valore in frequenza riscontrabile all'interno della banda X (8-12 GHz). In base a quanto riportato in letteratura tale assorbitore presenta uno dei limiti piuttosto ricorrenti per questo tipo di dispositivi: a fronte di un elevato assorbimento in corrispondenza della frequenza di lavoro, l'assorbitore perfetto esibisce qualità come tali solamente per un tipo di polarizzazione, per piccoli angoli di incidenza e per un valore molto ristretto in frequenza (quasi un valore puntuale). Parallelamente a quest'attività teorica a livello pratico è stata appresa la funzionalità del software di simulazione elettromagnetica Comsol Multiphysics, poi utilizzato in tutti gli step successivi.

Terminata questa prima fase di definizione dell'argomento, target del lavoro di Dottorato è stata l'individuazione di una configurazione o in alternativa di una struttura ex novo che esibisse prestazioni migliori in termini di assorbimento. Il metodo usato è stato di tipo numerico ed ha caratterizzato gran parte del percorso del triennio.

- I) Primo passo è stata l'implementazione di un modello simulativo di partenza che fungesse da piattaforma iniziale per i successivi step e che al contempo fornisse una prova numerica della validità del modello costruito in termini virtuali sulla piattaforma Comsol Multiphysics. In questo modo anche in assenza di verifiche sperimentali dirette, la riproduzione dei risultati di una struttura già nota a priori dalla letteratura scientifica ha dato una conferma della bontà del modello costruito virtualmente.

- II) Tenendo conto che sull'entità dell'assorbimento influiscono le capacità e le induttanze equivalenti a loro volta dipendenti dalla geometria delle inclusioni metalliche, gli step successivi si sono basati sulla progressiva modifica della struttura di partenza agendo in modo sempre più incisivo sulle dimensioni del risonatore, sulla disposizione spaziale del risonatore e sullo spessore dello slab dielettrico (modificato anche per esigenze legate ai materiali commercialmente disponibili in prospettiva alla possibilità di svolgere poi misure sul campo). Le modifiche di volta in volta introdotte sono state poi sottoposte a verifica simulativa numerica tramite Comsol Multiphysics per constatarne gli effetti fino ad individuare la struttura finale che salvaguardasse la relativa semplicità realizzativa ed evidenziasse al contempo un deciso miglioramento dell'assorbimento angolare del dispositivo.
- III) Le modifiche sono state effettuate seguendo una logica numerica. Noti dalla letteratura le connessioni tra forma e dimensioni geometriche delle inclusioni da un lato e gli effetti in termini di risonanze d'assorbimento dall'altro le modifiche nella geometria delle inclusioni sono state svolte facendo modo che l'assorbimento avvenisse all'interno della banda  $X^{2,3}$ .
- IV) Per rendere insensibile alla polarizzazione lineare (sia TE che TM) l'assorbimento angolare del dispositivo è stato infine necessario abbandonare la forma del risonatore quadrato ad anello aperto e passare ad una cella di simmetria quadrata con inclusioni metalliche a forma di svastica.

### III). Il software di simulazione: Comsol Multiphysics 4.4.

Oggetto della tesi è lo studio e la successiva progettazione di dispositivi che lavorano bene come assorbitori perfetti con tecnologia a metamateriale. Per la riproduzione di dispositivi già noti dalla

letteratura scientifica e per la progettazione di nuove strutture si è ricorso come sovente si fa in ambito scientifico ed ingegneristico ad un software di simulazione. Il software di simulazione a prescindere dall'ambito di ricerca preso in considerazione consente di implementare, verificare e produrre nuovi risultati. Può trattarsi di scenari economici, analisi statistiche, sistemi fisici di varia natura (elettrodinamica, ottica, termodinamica). Nel caso specifico il sistema fisico è di tipo elettromagnetico ed il software di simulazione utilizzato è Comsol Multiphysics versione 4.4. Le equazioni coinvolte nelle varie simulazioni fatte, a prescindere dal grado di complessità, sono le equazione di Maxwell e le leggi dell'ottica con particolare riferimento alle leggi di Fresnel. I parametri presi in considerazione sono la Trasmissione  $T(\omega)$ , l'Assorbimento  $A(\omega)$  e la Riflessione  $R(\omega)$ . Il modello tiene conto della presenza di fattori di dissipazione nei dielettrici utilizzati e della conducibilità delle inclusioni metalliche; permette inoltre una notevole flessibilità nella forma, nelle dimensioni e nel grado di complicazione delle strutture implementate. Le equazioni utilizzate sono risolte con il metodo degli elementi finiti<sup>6</sup>.

Tale metodo si applica ad un corpo 3D suddividendolo in tanti elementi finiti (mesh)<sup>7</sup>; in tal modo il sistema viene discretizzato. Per ridurre l'errore la mesh è resa più fitta nelle zone dove è più cruciale avere informazioni più dettagliate sul comportamento della struttura. Quanto più elevato è il numero degli elementi finiti tanto più realistico sarà il risultato ottenuto dalla simulazione numerica, a prezzo però di un appesantimento dell'iterazione numerica stessa.

Come accade in tutti i sistemi analizzati tramite il ricorso a metodi numerici, inoltre, la veridicità dei risultati ottenuti, ovvero l'attinenza tra quanto ricavato nella simulazione numerica con lo scenario reale, diventa sempre più inesatto quante più semplificazioni ed approssimazioni si introducono. Per tale ragione maggiore è il numero di parametri fisici e condizioni al contorno definiti maggiore è la probabilità di osservare risultati di senso fisico<sup>8,9,10</sup>.

A tal fine sia per seguire un filo logico nel percorso di tesi sia per verificare la validità del modello costruito sulla piattaforma Comsol Multiphysics è stato dapprima implementato l'assorbitore di Landy<sup>2</sup> riproducendone geometria, dimensioni e caratteristiche fisiche con l'aggiunta di opportune condizioni al contorno. Tale dispositivo è stato costruito a sua volta virtualmente a partire da un modello di slab dielettrico su cui erano state impostate le equazioni di Fresnel della trasmissione e della riflessione. In questo modo è stato possibile sia verificare la riproducibilità e quindi la validità del modello implementato sul software di simulazione elettromagnetica, effettuando un

confronto con quanto noto dalla letteratura scientifica, sia avere una struttura di partenza da cui poi, grazie alla flessibilità e portabilità di Comsol Multiphysics, è stato possibile introdurre modifiche crescenti per ottimizzare le prestazioni dell'assorbitore o progettarne ex novo avendo però su una base d'inizio.

## 1. METAMATERIALI E ASSORBITORI

### 1.1 Introduzione ai metamateriali

I metamateriali derivano il loro nome dall'unione della parola greca meta (oltre) e materiali, questo perchè sono una classe di materiali fabbricati artificialmente che esibiscono tutta una serie di proprietà peculiari elettromagnetiche a cui si correlano determinati fenomeni non riscontrabili in natura. La maggior parte dei metamateriali sono strutture periodiche consistenti in celle primitive ripetute ad intervalli regolari e costituite da inclusioni metalliche inserite all'interno di strati dielettrici.

Le proprietà dei metamateriali non dipendono (o solo in parte) dalla composizione chimica dei materiali utilizzati ma dalla loro forma geometrica; sono in particolare le dimensioni, la forma e l'orientamento delle inclusioni metalliche a determinarne le principali proprietà e prestazioni<sup>3</sup>. In particolare le dimensioni di un dispositivo metamateriale vanno progettate in relazione alla lunghezza d'onda della radiazione incidente utilizzata. Controllando tale parametro è possibile scalare le dimensioni della cella primitiva e far funzionare il dispositivo nella porzione di spettro elettromagnetico desiderata. Una categoria di particolare interesse è quella dei metamateriali elettromagnetici che rivelano un indice di rifrazione negativo, categoria questa nominata appunto dei metamateriali ad indice negativo.

I campi di applicazione sono potenzialmente molteplici e diversificati coinvolgendo il settore dell'energia, del monitoraggio ambientale, le microonde, l'aerospace e le telecomunicazioni. Tramite l'utilizzo di tali materiali è possibile fabbricare assorbitori, sensori, superlenti e perfezionare tecnologie con ricadute nel settore energetico e strategico. Essendo un campo tanto variegato e vasto trattasi di un tema scientifico multidisciplinare che coinvolge l'Elettromagnetismo, l'Ingegneria delle Microonde e delle Telecomunicazioni oltre che la Fisica dello Stato Solido, le Nanoscienze e la Scienza dei Materiali.

## 1.2 Storia dei metamateriali

L' esordio e il successivo sviluppo dei metamateriali come idea prima e come campo di ricerca con crescenti e diversificati campi di applicazione in seguito, risale agli studi compiuti dagli scienziati sull'interazione tra le onde elettromagnetiche e la materia a cavallo del XIX e XX secolo. Queste prime ricerche riguardarono la porzione del visibile dello spettro elettromagnetico<sup>4</sup>. Gli studiosi osservarono tutta una serie di fenomeni collegati con l'interazione radiazione e.m. materia, ponendo un focus particolare sulla polarizzazione della luce. Nel visibile furono così individuati alcuni comportamenti delle onde e.m.: per esempio quando una luce polarizzata linearmente attraversa materiali le cui molecole presentino una simmetria chirale (molecole non sovrapponibili con la loro immagine), questa si scompone in onde con polarizzazione circolare destra e sinistra. Tale fenomeno prede il nome di attività ottica. Queste prime osservazioni furono fatte con materiali presenti spontaneamente in natura. A questo punto fisici ed ingegneri iniziarono a prendere in considerazione la possibilità di riprodurre quanto osservato nella banda del visibile a frequenze più ridotte come nella porzione di spettro delle microonde.

Per raggiungere tale obiettivo era necessario trovare delle strutture che recitassero il medesimo ruolo delle molecole con le onde e.m. della banda del visibile. Comincio' così a farsi strada l'idea di fabbricare dei materiali artificiali, le quali proprietà dovevano soddisfare l'obiettivo che gli studiosi si prefiggevano. 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. Non essendo presenti in natura era necessario fabbricarli ex novo, utilizzando per esempio delle inclusioni metalliche all'interno di un opportuno strato dielettrico. Queste inclusioni metalliche erano costruite con una dimensione tale da poter agire sulle microonde cambiandone la polarizzazione, con un'attenzione particolare quindi per le sostanze chirali. I primi materiali artificiali erano costruiti inserendo all'interno di alcune resine delle inclusioni metalliche dalla forma elicoidale. La grande flessibilità con cui si possono far variare i parametri di fabbricazione (geometria e dimensioni, in primis) ha portato a scoprire effetti non osservabili normalmente in natura. La fabbricazione del primo metamateriale caratterizzato da un indice di rifrazione negativo risale al 2000 presso l'università di San Diego<sup>3,4</sup>. Tale evento è considerato come l'atto ufficiale di apertura dell'era dei metamateriali anche se le proprietà di un materiale ad indice di rifrazione negativo erano già state teorizzate e studiate dal fisico russo Veselago nel 1968<sup>1</sup>. Negli ultimi anni

la ricerca sui metamateriali ha subito una notevole accelerazione, diversificandosi in più branche sia a livello di letteratura scientifica sia in termini di potenziali campi di applicazione, con uno sforzo particolare nel realizzare il cloaking per frequenze sempre più ampie ed a lunghezze d'onda ottiche, mentre nell'ingegneria delle microonde i dispositivi a metamateriale trovano un sempre più largo utilizzo implementando e migliorando le tecnologie già da tempo esistenti grazie alle loro peculiarità.

### 1.3 Metamateriali elettromagnetici

Anche basandosi sulle considerazioni introduttive appena fatte si intuisce che i metamateriali rivestano un ruolo chiave nella fabbricazione e nello sviluppo di nuovi dispositivi con interessanti peculiarità sia nel visibile che in campo ottico (filtri, antenne, bolometri etc..). La scelta delle dimensioni dei dispositivi metamateriali è fondamentale per poterli trattare con uno specifico indice di rifrazione ed al contempo poterli vedere come materiali omogenei; ciò comporta che le loro dimensioni devono essere inferiori a quelle delle lunghezze d'onda caratteristica della zona di spettro elettromagnetico d'interesse<sup>3,4</sup>. Per esempio dispositivi metamateriali che devono operare nel visibile devono avere dimensioni dell'ordine della metà della lunghezza d'onda considerata (in generale per le frequenze ottiche siamo sotto al micrometro). Per metamateriali con frequenze di lavoro nel range delle microonde le dimensioni delle strutture sono dell'ordine dei millimetri. In genere si ricorre alla fabbricazione di celle periodiche con inclusioni metalliche a forma di strip, croci metalliche o split ring resonator quadrati o cilindrici; le forme geometriche e le dimensioni di tale strutture condizionano i valori di capacità ed induttanza che a loro volta vanno a determinare le frequenze di risonanza dove si manifesta il fenomeno (per esempio massimo assorbimento, nel caso degli assorbitori metamateriali perfetti)<sup>2,3,4</sup>. Esistono delle similitudini con le superfici selettive in frequenza ed i cristalli fotonici. Tuttavia pur presentando una struttura periodica come nel caso dei metamateriali propriamente detti, tali materiali differiscono per il fatto che le dimensioni sono simili alla lunghezza d'onda e non sono perciò trattabili come strutture omogeneizzabili.

## 1.4 Classificazione dei metamateriali e indice di rifrazione negativo

Una delle proprietà più rilevanti dei metamateriali (se non la principale) è la possibilità di fabbricare materiali caratterizzati da un indice di rifrazione negativo. Tale proprietà non è spontaneamente riscontrabile in natura. La maggior parte dei materiali dielettrici utilizzati presentano sia la permittività elettrica  $\epsilon$  che la permeabilità magnetica  $\mu$  positiva. La permittività elettrica e la permeabilità magnetica sono dei parametri che danno una misura di come i campi elettrici e magnetici interagiscano con la materia (parametri del materiale) polarizzandola. È opportuno ricordare le seguenti relazioni base dell'elettromagnetismo nella materia:

$$\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)\vec{E}, \quad \vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H}$$

$P$  ed  $M$  rappresentano rispettivamente i vettori polarizzazione elettrica e magnetica;  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\mu_0$ , e  $\mu_r$  indicano invece i valori della permittività e permeabilità magnetica nel vuoto e quelli relativi al dielettrico considerato: infine  $E$  ed  $H$  indicano i campi elettrico ed intensità magnetica. Le proprietà elettromagnetiche scritte più compattamente comportano le seguenti relazioni costitutive:

$$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r, \quad \mu = \mu_0\mu_r$$

In genere i valori delle permeabilità magnetica e permittività elettrica per descrivere in modo esaustivo e corretto le proprietà del dielettrico considerato sono scritte spesso in forma tensoriale, in quanto gli attributi elettromagnetici che esibisce un materiale possono variare lungo una o più direzioni (materiali non isotropi). I materiali possono perciò essere classificati in base ai valori che tali parametri assumono; a tal proposito è utile introdurre il seguente grafico che categorizza tutta la casistica delle proprietà elettromagnetiche.

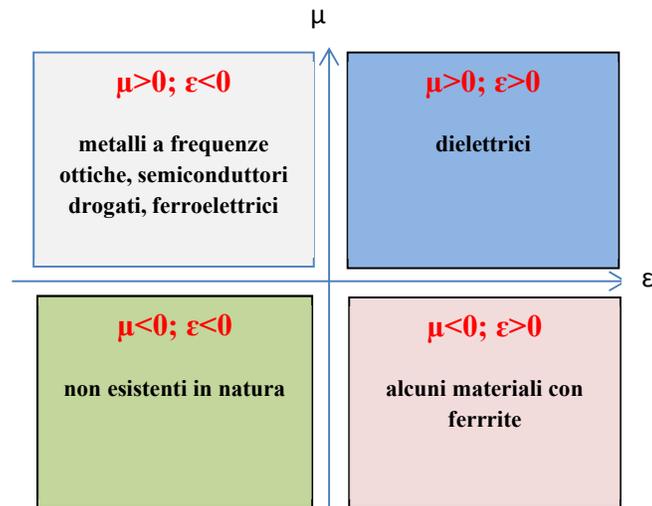


Figure 1.1 classificazione dei materiali in base ai valori di permeabilità magnetica e permittività elettrica; i metamateriali del tipo DNG si trovano nel terzo quadrante, esibendo ambo le proprietà elettromagnetiche negative.

Dal grafico si evince come:

- ✓ I tradizionali dielettrici ricadono nel primo quadrante quello con permeabilità e permittività positive
- ✓ I materiali ferroelectrici, i semiconduttori drogati e alcuni metalli a frequenze ottiche mostrano valori di permeabilità magnetica positiva e permittività elettrica negativa, ricadendo così nel secondo quadrante
- ✓ Cadano nel quarto quadrante i materiali con epsilon maggiore di zero e permeabilità negativa; e' il caso di alcune sostanze contenenti ferrite
- ✓ Infine, nel terzo quadrante, quelli con valori simultaneamente negativi di permeabilità e permittività si trovano dei materiali le cui proprietà non sono riscontrabili in nessun materiale esistente in natura.

I valori di  $\epsilon$  e  $\mu$  descrivono in modo completo e corretto il comportamento dei metamateriali, tuttavia per ragioni di praticità e' utile ragionare in termini di indice di rifrazione  $n$ , l'indice di rifrazione di una specifica sostanza. L'indice di rifrazione e' definito come:

$$n = \mp \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

A differenza che nel caso dei materiali presenti in natura e' stato preso in considerazione anche il segno meno in quanto la contemporanea negativita' della permeabilita' e della permittivita' comportano che la quantita' sotto radice sia positiva (quando solo una delle due grandezze e' positiva, la quantita' diventa negativa dando luogo ad un indice di rifrazione immaginario). Cio' implica la possibilita' di avere dei materiali realizzati artificialmente con un indice di rifrazione negativo<sup>4,5</sup>. Tale possibilita' era gia' stata avanzata dal fisico russo Victor Veselago nel 1968 ed implica tutta una serie di interessanti e peculiari caratteristiche che tali mezzi sono in grado di evidenziare.

1). Uno degli effetti piu' sorprendenti e' quanto accade alla legge di Snell, la quale continua a valere, ma si comporta in modo assai differente rispetto a quanto ci si aspetta classicamente. Consideriamo il seguente schema:

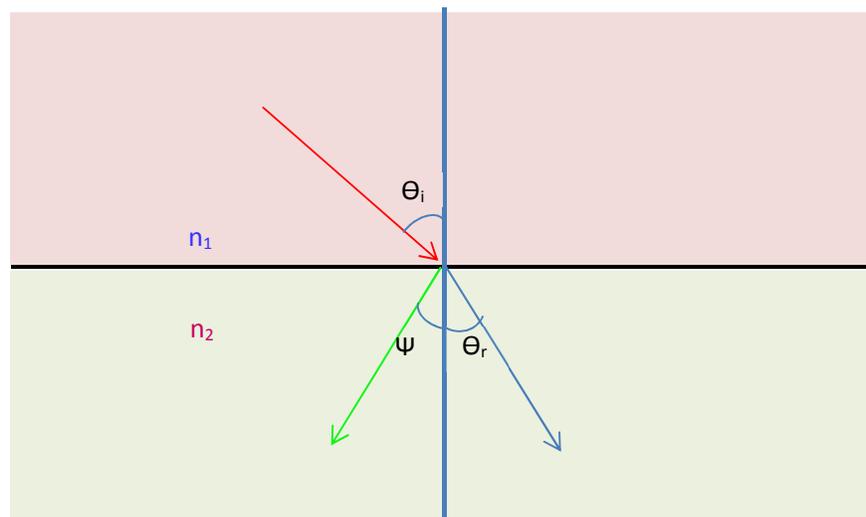


Figure 1.2 Rifrazione ordinaria e negativa. La freccia azzurra denota il percorso dell'onda elettromagnetica in presenza di dielettrici ordinari. La freccia verde indica invece il percorso che compie l'onda in presenza di indice di rifrazione negativo

La figura di cui sopra mostra il comportamento della radiazione incidente schematizzata in raggi incidente e rifratto in accordo all'ottica geometrica in corrispondenza della superficie di interfaccia

tra due mezzi dielettrici con indice di rifrazione rispettivamente  $n_1$  e  $n_2$ . La freccia azzurra denota il percorso del raggio rifratto qualora l'indice di rifrazione fosse positivo. E' questo il caso convenzionale dei dielettrici che si trovano in natura, in accordo alla legge di Snell:

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r)$$

Il percorso effettuato dal raggio in verde e' invece una peculiarita' straordinaria mai riscontrata in natura ed una delle proprieta' simbolo che hanno reso famosi i metamateriali artificiali. Infatti il raggio di luce viene rifratto nello stesso lato di quello incidente. Tale fenomeno e' ascrivibile alla presenza di un indice di rifrazione negativo. Nel caso dei metamateriali la legge di Snell seguita a valere ma muta la direzione della radiazione trasmessa in conseguenza del valore di  $n_2$  che e' positivo nel caso della rifrazione ordinaria e negativo invece sotto tale circostanza.

2). Cosi' come avviene per la rifrazione anche il fenomeno della radiazione Cherenkov cambia verso. La radiazione Cherenkov si manifesta in un mezzo quando questo e' attraversato da una particella carica che si muove ad una velocita' maggiore di quella luce nel mezzo ( ma inferiore a quella della luce nel vuoto  $c$ ); il passaggio della particella carica causa la formazione di momenti di dipolo temporanei nelle molecole del mezzo attraversato. Questi poi decadendo nella configurazione iniziale irradiano radiazione elettromagnetica che si allarga a cono intorno alla traiettoria della particella carica originando un' onda di shock assimilabile come comportamento al boom sonico che si verifica al seguito del transito di un'aereo supersonico:

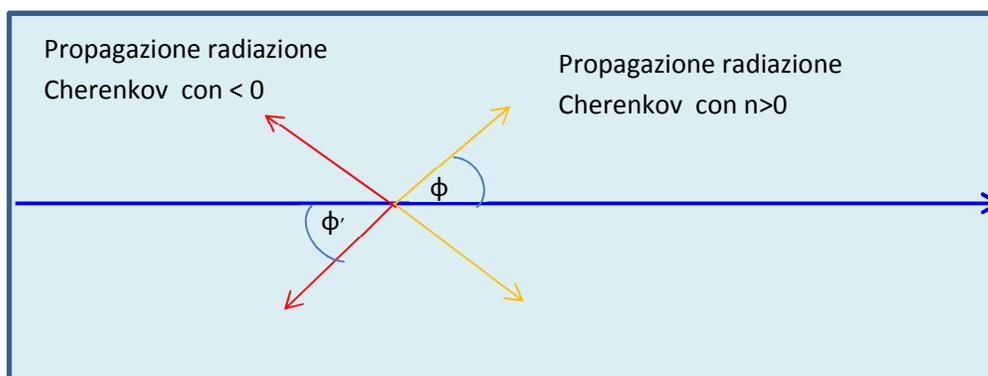


Figure 1.3 . Propagazione della radiazione di Cherenkov in materiali ordinari ed in quelli ad indice di rifrazione negativa. Nel caso dei metamateriali la direzione di propagazione dell'onda di shock è opposta; le frecce si riferiscono alla propagazione dei vettori d'onda.

Osservando la figura sovrastante si evince come cambia il comportamento di tale fenomeno. L'onda di shock della radiazione Cherenkov si propaga con un angolo dato dalla seguente relazione:

$$\cos\theta = \frac{c}{nv}$$

Con  $c$  velocità della luce,  $n$  indice di rifrazione del mezzo e  $v$  velocità della particella carica che attraversa il mezzo. In presenza di indice di rifrazione negativo  $n$  viene a cambiare segno con la conseguenza che in questo caso la direzione dell'onda di shock risulta sfasata di un fattore 180 gradi rispetto ai dielettrici ordinari con  $n$  positivo. Tale situazione è riportata nella figura precedente: le frecce gialle indicano la propagazione dei vettori d'onda dell'onda di shock con  $n$  positivo, quelle rosse in caso di  $n$  negativo.

3). Nei mezzi con  $n < 0$  una sorgente di radiazione che si avvicinasse mostrerebbe all'osservatore un fenomeno di redshift anziché di blueshift come normalmente accade nei materiali ordinari; la frequenza tenderebbe così a diminuire.

4). Il vettore di Poynting mediato nel tempo è antiparallelo alla velocità di fase, quindi anche al flusso di energia trasportata dal campo elettromagnetico; in altre parole il flusso di energia della radiazione elettromagnetica che si propaga in un mezzo con indice di rifrazione negativo è opposto al moto dei fronti d'onda<sup>4</sup>.

## 1.5 Assorbitori metamateriali: generalità

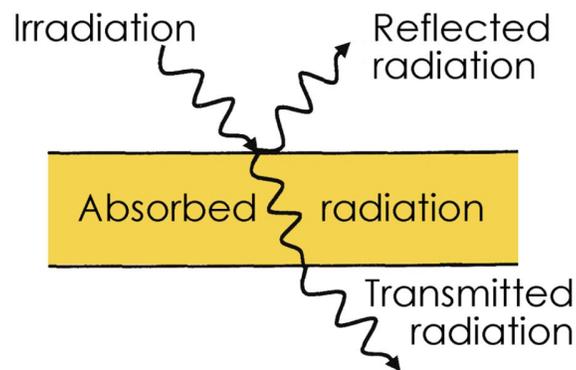
Il topic della tesi è lo studio degli assorbitori basati sulla tecnologia dei metamateriali con focus sui PMA risonanti costituiti da inclusioni metalliche di opportuna forma e dimensioni inseriti all'interno di uno strato dielettrico. Un assorbitore perfetto è un dispositivo che assorbe idealmente in modo approssimativamente unitario tutta la radiazione incidente con la trasmissione e la riflessione che invece tendono a zero<sup>2,3,4,5</sup>.

Nel caso della tecnologia a metamateriale gli assorbitori presentano molteplici vantaggi rispetto a quelli convenzionali. Generalmente i PMA sono molto flessibili riguardo alle possibilità di

miniaturalizzarli e sono anche più efficienti dei cugini tradizionali nelle prestazioni. Per tale ragione gli PMA vengono utilizzati sempre più largamente in campo strategico, energetico, nel monitoraggio ambientale e nelle telecomunicazioni. Tra i dispositivi basati su tale tecnologia ci sono i fotorivelatori, gli emettitori, dispositivi di camuffamento ottico nella banda infrarossa, senza tralasciare le applicazioni in ambito di solare fotovoltaico (aumento dell'efficienza energetica).

Le ottime prestazioni dei PMA rendono infatti questi appetibili per aumentare l'efficienza di assorbimento delle celle fotovoltaiche ed abbassano il consumo di energia in molti dispositivi optoelettronici come nei laser a diodi, negli emettitori di luce e nei fotorivelatori.

Di seguito è rappresentato il comportamento tipico delle onde e.m. in un dielettrico:



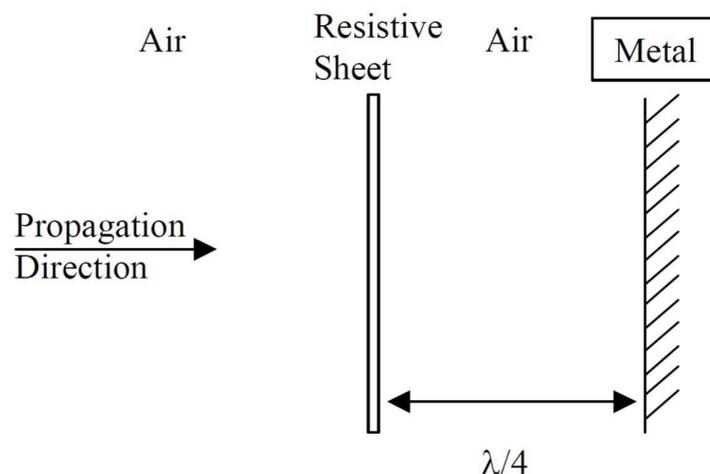
*Figure 1.4 Interazione tra radiazione elettromagnetica ed un dielettrico. La radiazione è in parte assorbita, trasmessa ed infine in parte riflessa. Negli assorbitori perfetti metamateriali (MPA), riflessione e trasmissione tendono a zero, in favore di un assorbimento idealmente quasi unitario<sup>5</sup>.*

Idealmente nei PMA tutta la radiazione è intercettata dalla struttura mentre riflessione, trasmissione e diffusione tendono a zero; l'intera energia dell'onda elettromagnetica è così assorbita senza che in uscita sia trasmesso nulla. Il limite di tale proprietà è che spesso tali qualità si evidenziano per piccoli intervalli di frequenza e per limitati valori dell'angolo con cui le onde elettromagnetiche incidono sul dispositivo PMA<sup>5</sup>.

## 1.6 I precursori degli assorbitori metamateriali: lo schermo di Salisbury e lo stato di Dallenbach

Dispositivi che a piena ragione possono essere considerati i progenitori dei PMA sono state delle strutture assorbenti denominate **schermo di Salisbury** e **strato di Dallenbach** (Salisbury screen and Dallenbach layer) dal nome degli ideatori. Questi dispositivi, utilizzati in campo strategico possono essere considerati, i progenitori degli assorbitori.

Lo **schermo di Salisbury** consiste di un piatto metallico davanti al quale ad una distanza di  $\lambda/4$  è posto un foglio resistivo (resistive sheet) che funziona da carico dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione incidente. In base alla teoria delle linee di trasmissione il piatto metallico si comporterà come un corto circuito, perciò il foglio resistivo (resistive sheet) verrà posto a  $\lambda/4$  questo dove è presente un circuito aperto. In tal modo la conduttanza tende a zero e l'onda che va ad incidere vede l'ammettenza del carico. Quando l'impedenza del carico eguaglia quella del vuoto (free space) la riflettività tenderà ad andare a zero. Se poi aggiungiamo nel dispositivo delle perdite l'assorbimento che ne deriverà risulterà potenzialmente elevato. Di seguito è illustrato lo schema del dispositivo di Salisbury<sup>5,11,12</sup>:



*Figure 1.5 Schema dello schermo di Salisbury. Tale modello di assorbitore è a ben ragione considerato un precursore degli MPA. Un foglio resistivo è posto ad una distanza  $\lambda/4$  da uno schermo metallico. La radiazione si propaga in aria; il medesimo mezzo è presente all'interno dell'assorbitore. Lo schermo di Salisbury ebbe grande fortuna nelle applicazioni di occultamento radar degli apparecchi bellici durante la seconda guerra mondiale<sup>5,12</sup>.*

Si nota il piano di massa metallico e il foglio resistivo che lavora da carico posto ad una distanza di  $\lambda/4$  da quest'ultimo. Dal punto di vista circuitale rispetto alla radiazione incidente la rappresentazione è la seguente:

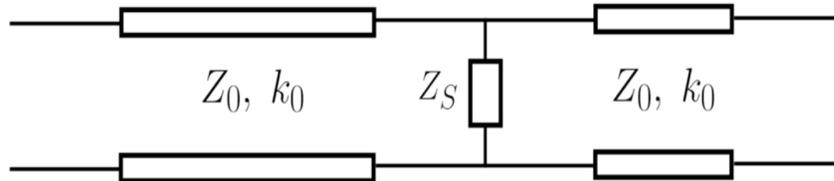


Figure 1.6 Rappresentazione circuitale in termini di linea di trasmissione equivalente dello schermo di Salisbury<sup>5</sup>

L'interesse di tali dispositivi è stato per molti anni di tipo strategico-militare in quanto lo scopo era rendersi invisibili ai radar degli avversari durante le operazioni della seconda guerra mondiale. Lo schermo elettromagnetico fu progettato da Salisbury nel 1940 per rendere invisibili ai radar nemici gli aerei militari, dando avvio all'epoca della tecnologia a Stealth<sup>3,11</sup>.

Operativamente lo schermo di Salisbury funziona con lo stesso principio dei rivestimenti antiriflesso che vengono posti su lenti e fotocamere. A seconda degli obiettivi lo spazio tra foglio resistivo e piano di massa può essere riempito di dielettrico con precise proprietà ottiche; lo spessore di tale strato deve restare comunque  $\lambda/4$  con  $\lambda$  lunghezza d'onda dell'onda che il radar deve rilevare. Dal punto di vista fisico quando l'onda e.m. penetra all'interno del dispositivo si ha una sequenza di eventi che determinano la cancellazione di qualsiasi forma di energia riflessa.

La spiegazione di quanto accade risiede nel fenomeno dell'interferenza; quando due onde viaggiano nello stesso spazio in opposizione di fase e presentano il medesimo picco d'ampiezza si ha una reciproca elisione dei contributi per interferenza distruttiva. Pertanto il radar non rivela un ipotetico dispositivo dotato di tale tecnologia. La corrispettiva spiegazione matematica risiede nel comportamento delle impedenze in tale dispositivo assorbente:

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{R_S}$$

La riflessione va a zero quando  $R_s=377 \Omega$ ;  $Z_{in}$  rappresenta l'impedenza d'ingresso. Tali circostanze si verificano per lunghezze della linea di trasmissione  $L$  pari a  $\lambda/4$  o  $\lambda/4 + n\lambda/2$  con  $n=0$  o intero positivo. Tale relazione indica la condizione necessaria affinché il carico risulti adattato, annullando l'onda riflessa.

Lo schermo di Salisbury è più efficiente in condizioni di incidenza normale, mentre quando le onde elettromagnetiche incidono in modo obliquo sul dispositivo la percentuale di radiazione riflessa incrementa all'aumentare dell'angolo di incidenza. Per ambo le polarizzazioni verticale e orizzontale vale la seguente relazione:

$$\Gamma_v = \Gamma_p \simeq \frac{1 - \cos\theta}{1 + \cos\theta}$$

Con  $\theta$  angolo tra la normale alla superficie e la direzione di avanzamento del fronte d'onda della radiazione incidente<sup>11</sup>.

Lo **strato di Dallenbach** presenta una struttura assai simile a quella dello schermo di Salisbury come si evince dalla figura sottostante:

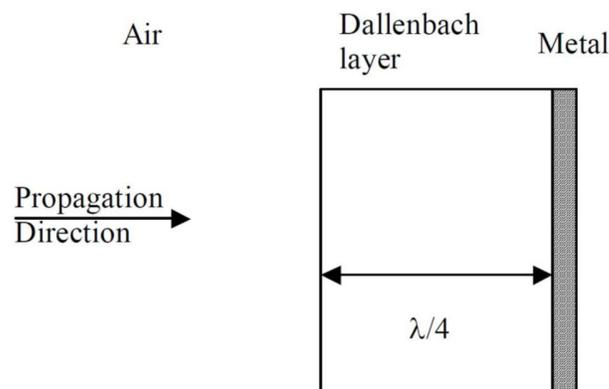


Figura 1.7: schema dispositivo di Dallenbach, una variante dello schermo di Salisbury.

*Si noti la presenza di uno strato dielettrico*

L'assorbitore di Dallenbach presenta uno strato dielettrico con perdite di spessore  $\lambda/4$  (un quarto della lunghezza d'onda della radiazione incidente). Il meccanismo con cui le onde e.m. vengono

interamente assorbite e rimosse dalla “vista” di un ipotetico rivelatore radar è simile sia per l’assorbitore di Dallenbach che per quello di di Salisbury. Nel caso del Dallenbach layer valgono le seguenti relazioni per il coefficiente di riflessione<sup>12</sup>:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad \text{con } Z_{in} = Z_i \frac{Z_{load} + jZ_i \tanh(\gamma t)}{Z_i + jZ_{load} \tanh(\gamma t)}$$

Dove  $Z_i$  è l’impedenza dello strato materiale,  $Z_{in}$  l’impedenza d’ingresso,  $Z_{load}$  è l’impedenza del materiale posteriore mentre  $t$  indica lo spessore della superficie esterna. Valgono inoltre le ulteriori relazioni:

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\varepsilon' - j\varepsilon''}}$$

La costante di propagazione è  $\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ <sup>11</sup>

Come si vede chiaramente, la riflessione sulla superficie di un materiale è dovuta al cambio di impedenza che l’onda vede nell’interfaccia tra i due mezzi. Quindi se si utilizza un materiale la cui impedenza rispetto al vuoto sia uguale ad 1 ( $\mu_r = \varepsilon_r$ ) qualsiasi riflessione sarà annullata sulla superficie. In tali circostanze per avere assorbimento completo il fattore chiave saranno l’entità delle perdite dielettriche (parte immaginaria delle permittività elettrica e della permeabilità magnetica) e lo spessore stesso dello strato dielettrico. Il limite di tale assorbitore consiste nel fatto che di volta in volta occorre lavorare sulle perdite dielettriche al fine di migliorare le prestazioni nella frequenza desiderata in cui si opera<sup>11,12,13</sup>.

## 1.7 Assorbitori risonanti e a larga banda (broadband)

Gli assorbitori possono essere classificati in due grandi categorie: risonanti (resonant) e a larga banda (broadband). Gli **assorbitori risonanti** funzionano con lo stesso meccanismo dell’assorbitore di Salisbury con un foglio resistivo posto a  $\lambda/4$  da un piatto metallico. In tali condizioni il foglio resistivo è posto in un circuito aperto favorendo un annullamento della riflessione come già visto. Negli assorbitori risonanti il dispositivo funziona come assorbitore ad

uno specifico valore di frequenza detta frequenza di lavoro. Un esempio di assorbitore risonante è l'assorbitore di Jaumann il quale può essere a ben ragione considerato un'evoluzione dello schermo di Salisbury. Il principio che sta alla base del funzionamento di tale dispositivo è basato sempre sul posizionamento di un foglio resistivo ad una distanza di  $\lambda/4$  da un piatto metallico, la differenza è che però l'assorbitore di Jaumann opera su più frequenze di lavoro essendo composto da più fogli resistivi distanziati ciascuno tra di loro di una quantità  $\lambda/4$ . Con tale configurazione ogni foglio resistivo dà luogo ad un minimo nella riflessione e si può così ottenere un dispositivo con risonanze multiple di assorbimento attorno ad una frequenza principale. Lavorando opportunamente la struttura si può trasformare da assorbitore risonante in un assorbitore a larga banda.

Un altro tipo di assorbitori risonanti designati come **crossed grating absorber** si basano sull'utilizzo di un piano metallico lavorato in modo tale da costituire un reticolo periodico; le onde elettromagnetiche incidendovi danno luogo ad una diffrazione anomala. La possibilità che la diffrazione anomala potesse essere legata ad un forte assorbimento venne postulata fin dal 1902 da R.W. Wood che lavorò su tale argomento. Nel 1976 venne dimostrato che il reticolo periodico funzionava come un buon assorbitore per la luce polarizzata, e poco dopo arrivarono anche le conferme sperimentali. Un'evoluzione più recente, rappresentata dall'utilizzo di un doppio reticolo periodico, ha consentito di estendere le prestazioni in termini di assorbimento anche alla luce non polarizzata<sup>3</sup>.

Altra rilevante classe di assorbitori risonanti è rappresentata dagli **assorbitori a circuiti analogici**. Sono basati come per l'assorbitore di Jaumann su un'estensione dell'assorbitore di Salisbury progettati sull'assemblaggio di uno o più fogli composti sia di componenti reattivi che resistivi disposti in un array periodico di fronte ad un singolo piano di massa. Come precedentemente per gli assorbitori risonanti il piano di massa è ad una distanza di  $\lambda/4$  dietro la superficie selettiva in frequenza (frequency selective surface FSS). I più recenti assorbitori a circuiti analogici hanno permesso di ottenere elevati valori di assorbimento per grandi angoli di incidenza e per una larga banda in frequenza. Di seguito ecco un paio di esempi di assorbitori basati su circuiti analogici

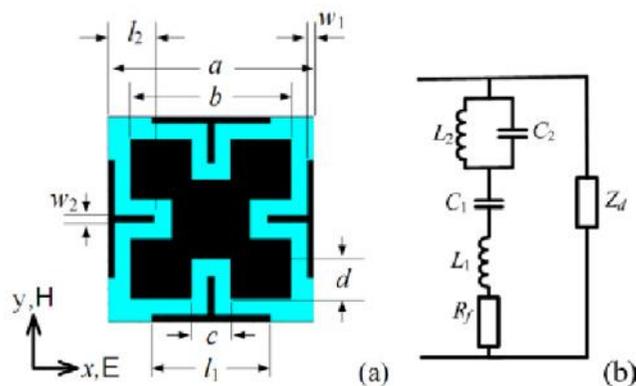


Figura 1.8: esempio di una cella primitiva di una superficie selettiva in frequenza (FSS Frequency Selective Frequency), facente a sua volta parte di un dispositivo assorbente. Sulla destra è invece mostrato il circuito equivalente corrispondente<sup>14</sup>.

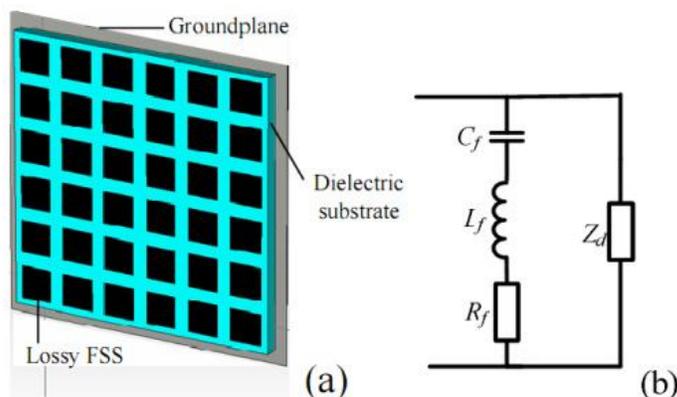
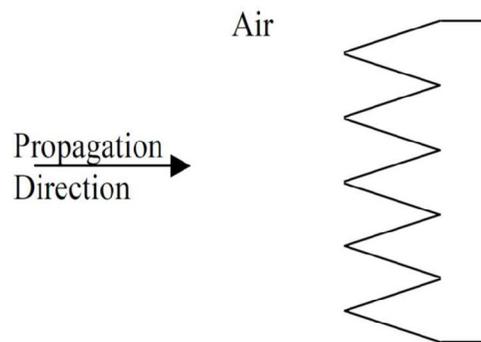


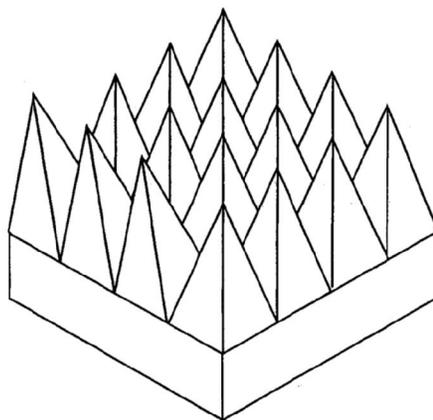
Figura 1.9 Struttura di un assorbitore risonante basato su circuiti analogici. Su un substrato dielettrico sono depositate delle celle di una superficie selettiva in frequenza dissipativa. A chiudere il circuito sull'altro lato è posto un piano di massa. Sulla destra è rappresentato il circuito equivalente<sup>14</sup>.

Le figure di cui sopra mostrano due esempi di assorbitori basati su circuiti analogici. La prima immagine in alto mostra il dettaglio di una cella costituente un assorbitore ed il circuito equivalente corrispondente con l'orientazione dei campi E ed H assegnati nello spazio; la seconda invece mostra la struttura del dispositivo nelle sue varie componenti. Le celle in nero rappresentano le parti della superficie selettiva in frequenza disposte sulla superficie di un substrato dielettrico, sull'altra estremità di quest'ultimo è posto invece un piano di massa. Anche in questo caso la figura riporta il circuito equivalente a tale configurazione. Gli assorbitori a circuiti analogici sono ottenuti disponendo delle particelle metalliche su un substrato dielettrico o incidendo periodicamente uno schermo metallico posto sempre sopra ad un substrato dielettrico. Sul lato opposto lo schermo metallico è posto ad una distanza di  $\lambda/4$ <sup>14</sup>.

Gli **assorbitori a larga banda** sono così definiti in quanto esibiscono un buon assorbimento non per un singolo valore puntuale in frequenza ma su una finestra più o meno ampia che consente così di intercettare e rimuovere le onde elettromagnetiche la cui frequenza ricada in detto intervallo. Uno degli assorbitori a larga banda più noto è rappresentato dall'assorbitore a transizione geometrica, utilizzato nelle camere anecoiche. La forma di questi assorbitori è piramidale o cuneiforme e tale geometria porta l'impedenza a variare lentamente da quella dello spazio vuoto fino a quella del materiale con perdite come mostrato nelle seguenti figure:



*Figura 1.10 Gli assorbitori a larga banda detti anche a transizione geometrica sono utilizzati nelle camere anecoiche e consentono l'assorbimento di onde elettromagnetiche per larghe bande in frequenza<sup>5</sup>.*



*Figura 1.11 Altro esempio di assorbitori a larga banda di forma piramidale<sup>5</sup>*

Le immagini sopra riportate mostrano due esempi di assorbitori piramidali e il loro principio di funzionamento. La radiazione elettromagnetica viene assorbita interamente grazie alla transizione geometrica. Questo tipo di assorbitori trovano larga applicazione nelle camere anecoiche ove si svolgono spesso misure che richiedono la totale mancanza di echi.

I vantaggi di questo tipo di assorbitori è che esibiscono la capacità di assorbire onde elettromagnetiche appartenenti ad un certo intervallo di frequenze e non solo per una singola frequenza rendendoli dei dispositivi broadband; accanto a tale proprietà spesso si manifesta anche la capacità di assorbimento per elevati valori dell'angolo di incidenza della radiazione incidente. L'altra faccia della medaglia di questo tipo di assorbitori sono rappresentate dalle dimensioni e dalla fragilità meccanica. La prima problematica è riconducibile al fatto che gli assorbitori a transizione geometrica hanno dimensioni caratteristiche maggiori della lunghezza d'onda della radiazione di incidenza ed in connessione con tale caratteristica ne deriva anche una facile usura, a causa della struttura d'insieme che tende ad essere fragile e facilmente alterabile<sup>5</sup>.

## 1.8 Gli assorbitori a metamateriali PMA

A partire dagli anni '90 sono entrati gradualmente in scena i metamateriali che grazie alle loro proprietà esotiche ed alla loro versatilità sono diventati uno dei principali candidati per poter fabbricare assorbitori sempre più efficienti e progettati ad hoc per agire in una specifica zona dello spettro elettromagnetico; attualmente gli assorbitori a tecnologia MTM trovano già impiego nella banda delle microonde e nell'infrarosso ossia da frequenze dell'ordine dei GHz fino ai THz. Numerose sono infatti le applicazioni nell'ambito delle telecomunicazioni, della trasmissione di energia e segnali, nel fotovoltaico<sup>15,16</sup> e soprattutto in ambito strategico militare, nel cloaking o anche come bolometri. Tale tecnologia è sempre più attuale ed in via di forte e rapido sviluppo. Si è già visto che un metamateriale può essere ottenuto facendo ricorso a dei risonatori quadrati, a delle strip metalliche o ancora a dei wire medium opportunamente lavorati e disposti nello spazio rispetto alla radiazione incidente per esibire le proprietà tipiche del MTM. <sup>17 18</sup>

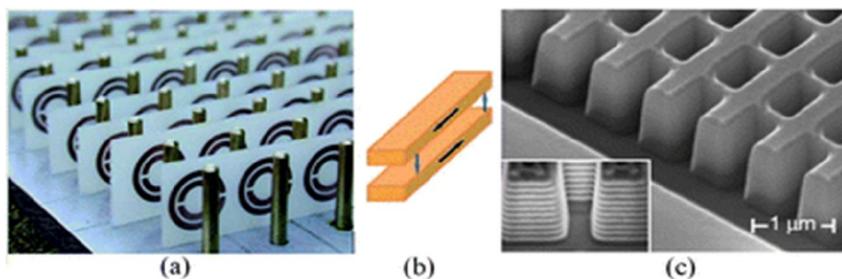


Figura 1.12 tre diverse configurazioni per ottenere un metamateriale dalle note proprietà esotiche<sup>18</sup>

La figura 1.12 mostra tre diverse configurazioni con cui è possibile ottenere un metamateriale. Il riquadro evidenzia un risonatore ad anello con disposto davanti un wire medium (un filo metallico), nel frame b sono invece visibili due piccole strutture a strati accoppiati ed infine l'ultima situazione la c mostra una geometria a fishnet (a rete da pesca). Con tali configurazioni si produce una risposta elettrica e magnetica tale da generare una risonanza con permeabilità magnetica e permittività elettrica simultaneamente negative<sup>18</sup>. La grande varietà e versatilità di forme e dimensioni che possono avere i metamateriali suggeriscono già di fatto le enormi potenzialità tecnologiche che questi materiali hanno e potranno avere in campo ottico ed elettromagnetico. I metamateriali sono quindi ottimi candidati per costruire assorbitori elettromagnetici sempre più efficienti e versatili. Di seguito è mostrata la modalità con cui la radiazione incidente interagisce con questi materiali dalle caratteristiche così inusuali in relazione alla disposizione spaziale.

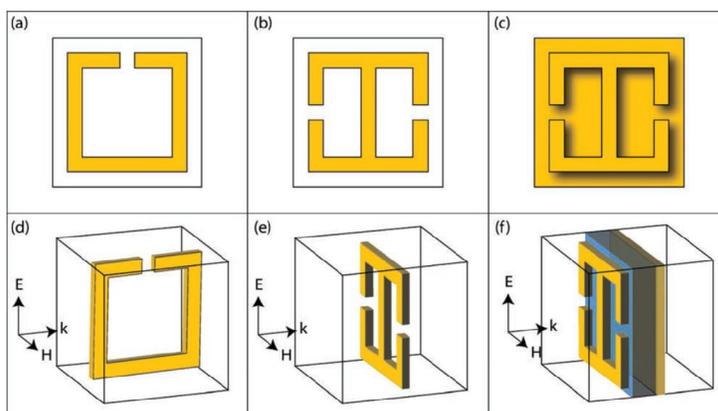


Figura 1.13 Esempi di celle primitive di strutture metamateriali e relativo orientamento rispetto alla radiazione incidente per avere delle risonanze<sup>3</sup>

Con celle primitive della forma di split square resonator della forma posta alla sinistra (riquadri a e d), esponendo tale geometria ad una radiazione in cui il vettore d'onda è parallelo al lato dove è presente lo split mentre i vettori E ed H sono ortogonali si viene a creare una risposta magnetica del tipo Lorentziana. Il ring quadrato mostrato nei frame centrali della figura con due lati tagliati (doppio split) e dotato di una strip centrata che connette i due lati opposti non tagliati da luogo, se esposto ad un'onda polarizzata con il campo elettrico E parallelo ai lati dotati di split e vettore d'onda  $k$  ortogonale al piano ove giace il risonatore quadrato, ad una risonanza nella permittività elettrica. Infine mantenendo inalterata la disposizione del risonatore quadrato e della polarizzazione dell'onda ma chiudendo la cella con un piano di massa metallico (riquadri c ed f) si perviene ad una configurazione che manifesta una risposta in termini di risonanza sia elettrica che magnetica, condizione necessaria per applicare i metamateriali come assorbitori. La configurazione dei riquadri b ed e è infatti simile a quella dell'assorbitore di Landy e Padilla che poi verrà preso in esame successivamente<sup>2</sup>.

Le metallizzazioni più frequenti cui si fa ricorso per assemblare le celle facenti parte degli array metamateriali sono in rame, argento o oro. Le risonanze che si osservano possono essere regolate intervenendo sulla geometria della cella primitiva tenendo conto della fisica di tali dispositivi. La risposta magnetica è ascrivibile alle correnti che si producono nel risonatore quadrato e, come nel caso della configurazione dotata di piano di massa, in quest'ultimo. Queste accoppiandosi al campo magnetico dell'onda incidente danno luogo a risonanze nella permeabilità. E per avere un controllo su tale aspetto è necessario intervenire sulla distanza che separa lo split ring dal piano di massa; per agire sulla risposta elettrica (ossia in termini di permittività) occorre invece agire sulle dimensioni del risonatore<sup>3</sup>.

In base a quanto detto finora sui metamateriali e sugli assorbitori, i PMA sono schematizzabili in gran parte (ma non sempre) da tre blocchi: due di queste parti sono composte da inclusioni metalliche come in rame o argento separate da uno strato dielettrico che completa il dispositivo. Le inclusioni metalliche possono essere delle più svariate forme e dimensioni a seconda del range in frequenza d'azione per cui sono stati progettati. Le forme più frequenti utilizzate sono risonatori quadrati, cilindrici, wire medium, croci e strip metalliche. A prima vista la struttura base di un PMA non è molto diversa da quella di altri assorbitori tradizionali già visti come il Dallenbach

layer e il Salisbury screen ed effettivamente la logica a blocchi è la medesima, ma il vantaggio consiste nel fatto che i PMA sono più piccoli della lunghezza d'onda che corrisponde alla frequenza di lavoro. Di conseguenza gli slab dielettrici compresi tra le inclusioni metalliche sono molto sottili.

Inoltre la possibilità di progettare e realizzare PMA di svariate forme e dimensioni - e tenendo conto che è proprio la geometria il principale fattore che determina in quale parte dello spettro elettromagnetico va a manifestarsi la risonanza d'assorbimento- ha favorito una rapida evoluzione degli PMA. Se infatti la roccaforte degli PMA era originariamente di tipo strategico-militare e si limitava alle microonde, ora tale tecnologia è disponibile anche nella banda dei THz fino a comprendere l'infrarosso medio e vicino. I PMA possono essere utilizzati come bolometri, nel fotovoltaico per aumentare l'efficienza quantica di una cella fotovoltaica e nella trasmissione dei segnali.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di assorbitori metamateriali dove è possibile osservarne la struttura:

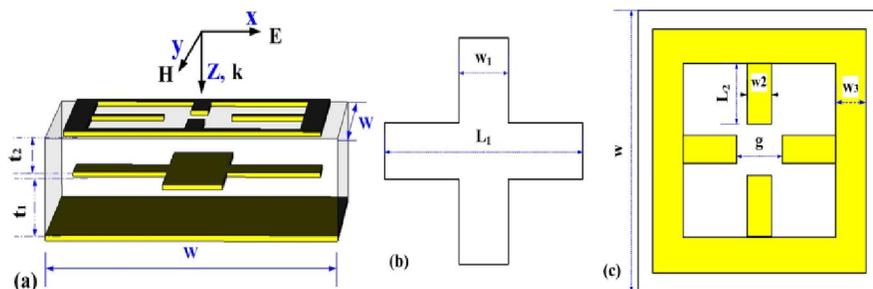


Figura 1.13: esempio di struttura di una cella primitiva di un assorbitore MTM operante nella banda dei THz. Da sinistra verso destra: a) sezione di lato della struttura a strati della cella; b) inclusione metallica a croce del piano intermedio; c) inclusione metalliche del piano top<sup>14</sup>.

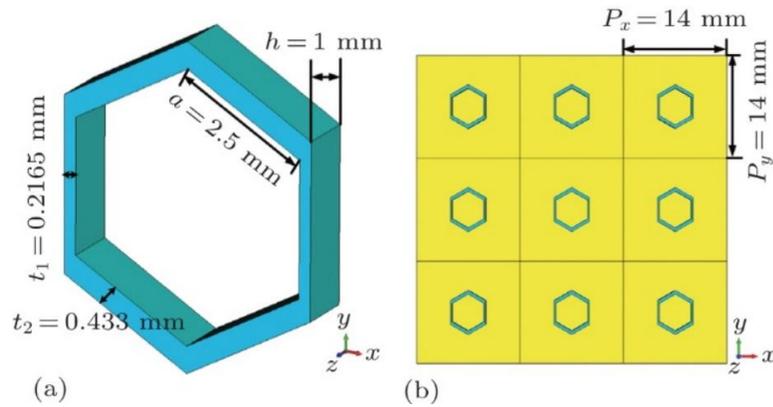


Figura 1.14 MPMAPA a con celle unitarie di forma esagonale. Sono evidenziate le dimensioni. Tale device funziona come assorbitore nelle microonde e presenta come peculiarità rispetto ad altri PMA la costituzione delle celle che sono in materiale dielettrico e non in metallo; quest'ultimo invece ricopre la superficie inferiore dell'assorbitore (riquadro b) in forma di piatto metallico<sup>20</sup>.

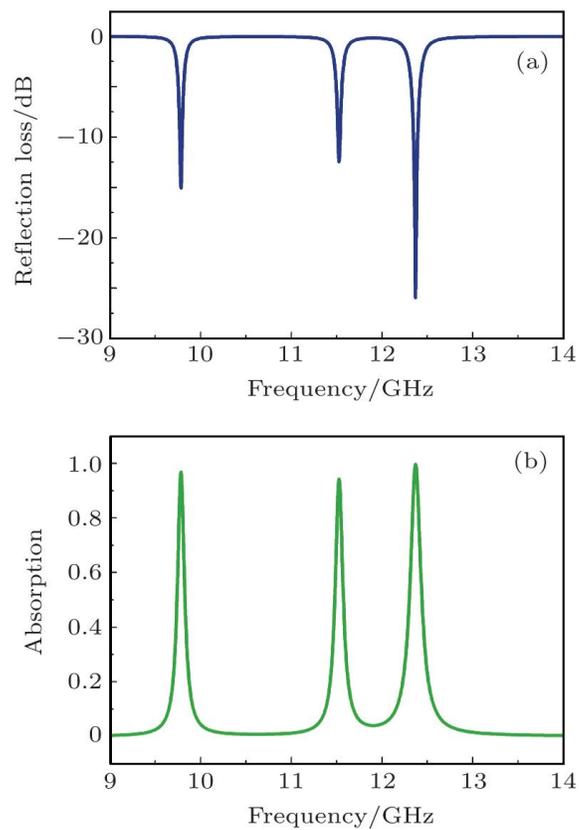


Figura 1.15: Risonanze d'assorbimento del dispositivo a celle esagonali: si tratta di un assorbitore a risonanze multiple ricadenti in gran parte nella banda X delle microonde<sup>20</sup>

La figura 1.13 riporta un esempio di struttura di un assorbitore ai THz no polarization sensitive. In questo caso l'assorbitore è costituito da cinque parti: due strati dielettrici compresi tra un risonatore quadrato dotato di ulteriori strip a croce, una croce metallica ed un piatto metallico che funzionando da piano di massa chiude il circuito. La struttura è operante sia con radiazione TE che TM.

La seconda immagine della pagina precedente mostra invece un assorbitore MTM con celle unitarie di forma esagonale; sono anche indicate le dimensioni e la disposizione che hanno nel corrispondente array costituente il PMA. La particolarità di questo assorbitore consiste nel fatto che le celle esagonali sono state costruite con materiale dielettrico anzi che seguire la più consolidata strada che vede l'utilizzazione di metallizzazioni. Il metallo viene invece utilizzato per chiudere la cella con un piano di massa (fig.1.14). Questo PMA manifesta più frequenze di risonanza in cui esibisce proprietà di assorbitore perfetto con ben tre picchi tra i 9 ed i 13 GHz, zona dello spettro corrispondente più o meno alla banda X delle microonde <sup>20</sup>.

In definitiva già da questi pochi esempi appena descritti è evidente che l'introduzione dei metamateriali come tecnologia per la fabbricazione di dispositivi elettromagnetici assorbenti ha permesso una rapida evoluzione delle performance di tali dispositivi. La grande flessibilità nel poter costruire celle delle più svariate forme e dimensioni sta spalancando le porte per molte applicazioni pratiche in diversi campi tecnici che vanno dall'Ottica, alla Fisica e all'Ingegneria.

## 1.9 Elementi di Fisica degli assorbitori

Prima di proseguire nello svolgimento della tesi introducendo quella che è stata la struttura PMA di partenza, da cui poi ha preso le mosse tutto il successivo svolgimento della Ricerca di Dottorato, verranno qui richiamati brevemente per questioni di completezza alcuni concetti di Fisica degli assorbitori che spiegano come la radiazione e.m. interagisce con queste strutture affinché poi si manifestino i noti effetti.

Per comprendere il comportamento dei PMA, vista la loro struttura, è opportuno prendere in considerazione la modalità con cui le onde elettromagnetiche interagiscono con uno slab dielettrico, le cui proprietà elettriche e magnetiche sono descritte dalla permeabilità magnetica e dalla permittività elettrica che in questo caso assumono le seguenti forme:

$$\begin{cases} \mu = \mu_0 \mu_r(\omega) \text{ con } \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \\ \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) \text{ con } \varepsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \text{ Fm}^{-1} \end{cases}$$

I parametri  $\mu_r(\omega)$  e  $\varepsilon_r(\omega)$  sono adimensionali e normalizzati rispetto ai valori dello spazio libero. Per comprendere l'interazione onde e.m. metamateriali si prendono in considerazione due situazioni che si avvicinano alla struttura e al comportamento di un PMA.

La prima situazione vede uno slab dielettrico raggiunto da radiazione elettromagnetica che si chiude su un piano metallico sulla superficie opposta a quella da dove arriva la radiazione incidente. Il secondo caso invece prevede l'interazione radiazione materia con lo strato dielettrico compreso tra due zone occupate da vuoto. Lo slab ha spessore assegnato  $d$ .

I). Strato dielettrico con piatto metallico. Lo schema di questa prima opzione è mostrato nella seguente figura:

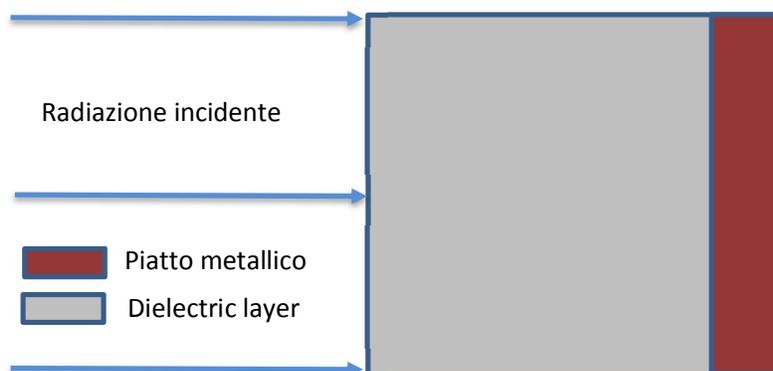


Figure 1.16 radiazione incidente su uno strato dielettrico chiuso sulla superficie opposta a quella di incidenza con un piatto metallico

Le onde elettromagnetiche incidono sullo slab dielettrico; essendo presente un piatto metallico sulla superficie opposta a quella di incidenza, la trasmissione sarà nulla.

Come primo passo scriviamo le espressioni di  $R_E$  e  $R_M$  la riflettività, rispettivamente per radiazione di tipo trasverso elettrica e trasverso magnetica per onde e.m che incidono su un interfaccia tra due dielettrici:

$$\begin{cases} R_E = |r_E|^2 = \left| \frac{\cos\varphi - \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{\cos\varphi + \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}} \right|^2 \\ R_M = |r_M|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r \cos\varphi - \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{\varepsilon_r \cos\varphi + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}} \right|^2 \\ n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \end{cases}$$

Nelle relazioni appena scritte  $\varphi$  denota l'angolo di incidenza delle onde elettromagnetiche,  $n$  l'indice di rifrazione del mezzo,  $r_M$  et  $r_E$  i coefficienti di riflessione rispettivamente per onde polarizzate TM e TE.

Imponendo condizioni di incidenza normale si ha  $\varphi=0$  e di conseguenza  $\sin\varphi=0$  et  $\cos\varphi=1$  perciò le precedenti equazioni si riconducono alla seguente forma:

$$\begin{cases} R_E = |r_E|^2 = \left| \frac{1 - \mu_r^{-1}n}{1 + \mu_r^{-1}n} \right|^2 = \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 \\ R_M = |r_M|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r - n}{\varepsilon_r + n} \right|^2 = \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 \\ n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \end{cases}$$

In condizioni di normale incidenza le precedenti relazioni per la riflettanza in polarizzazione TE o TM convergono verso il medesimo risultato da cui  $R_E=R_M$ . I passaggi matematici che portano la seconda equazione delle precedenti ad assumere lo stesso risultato della prima sono i seguenti;

$$R_M = |r_M|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r - n}{\varepsilon_r + n} \right|^2 = \left| \frac{\mu_r \varepsilon_r - \mu_r n}{\mu_r \varepsilon_r + n \mu_r} \right|^2 = \left| \frac{n^2 - \mu_r n}{n^2 + n \mu_r} \right|^2 = \left| \frac{n - \mu_r}{n + \mu_r} \right|^2 = \left| \frac{\mu_r - n}{n + \mu_r} \right|^2$$

Dove si è moltiplicata l'equazione per l'indice di rifrazione sia a numeratore che a denominatore e con successivi passaggi si è pervenuti alla relazione scritta precedentemente.

Tenendo inoltre conto del fatto che le impedenze del mezzo dielettrico e del vuoto possono essere scritte come:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}; \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

Vale anche l'ulteriore equazione:  $R = \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2$

Da cui poi essendo la trasmittanza nulla la relazione che lega assorbanza, trasmittanza e riflettanza diviene:

$$A = 1 - R - T = 1 - R = \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2$$

Dove si è tenuto conto dei ragionamenti appena visti. La validità di questa equazione è limitata alla riflettività per un'interfaccia e perciò la radiazione può ancora essere trasmessa attraverso il mezzo<sup>3</sup>.

Un più completo trattamento dei due casi può essere ottenuto ricorrendo al metodo della matrice di trasferimento. Consideriamo un sistema a tre strati con la radiazione incidente che proviene dal vuoto ed incide su uno strato di materiale magneto-dielettrico di spessore  $d$  i cui valori di permittività elettrica e di permeabilità magnetica assumono le seguenti forme, in conformità al modello dei Drude-Lorentz, ottenuto trattando gli elettroni del dielettrico come fossero degli oscillatori armonici durante l'interazione con il campo elettrico dell'onda incidente<sup>3,5</sup>:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma_e \omega}; \quad \mu'(\omega) = \mu_\infty + \frac{\omega_{p,m}^2}{\omega_{0,m}^2 - \omega^2 - i\gamma_m \omega}$$

Dove:

$\omega_p$ ,  $\omega_{p,m}$  sono le frequenze di plasma;  $\omega_0$  e  $\omega_{0,m}$  rappresentano il centro dell'oscillazione in frequenza dell'oscillatore;  $\gamma_e$  e  $\gamma_m$  sono le frequenze di smorzamento;  $\varepsilon_\infty$ ,  $\mu_\infty$  le permittività elettrica e la permeabilità magnetica all'infinito. L'apice  $m$  denota le grandezze che si riferiscono alla permeabilità magnetica. Condizione necessaria affinché si abbia il massimo assorbimento è la seguente:

$$\varepsilon'(\omega) = \mu'(\omega)$$

in tali condizioni viene a verificarsi picco di assorbimento con la riflessione che invece va a zero. La trasmittanza invece si mantiene nulla grazie alla presenza del piatto metallico.

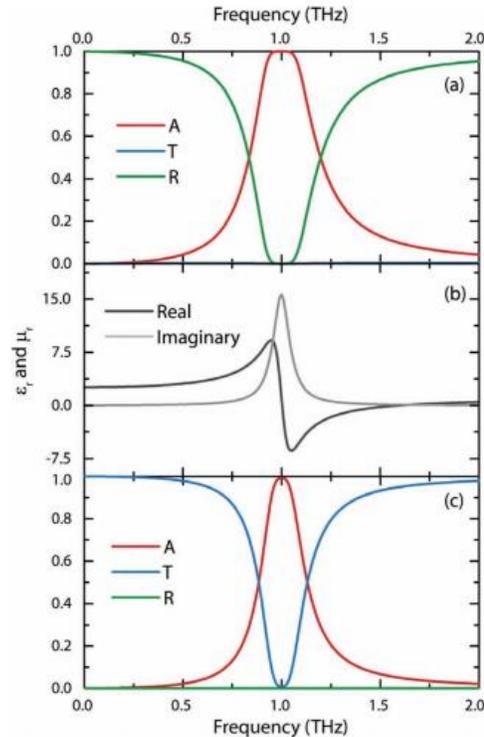


Figura 1.17: a). esempio di risonanza da uno slab dielettrico con appoggiato un piatto metallico. Si evidenzia un picco d'assorbimento nei THz. I parametri scelti sono  $\omega_p = 2\pi \times 1.25$  THz,  $\omega_0 = 2\pi \times 1.0$  THz,  $\gamma = 2\pi \times 0.1$  THz e  $\varepsilon_\infty = 1$  per lo slab magnetodielettrico. Per il metallo si ha invece:  $d\omega_p = 2\pi \times 2175$  THz,  $\omega_0 = 0$ ,  $\gamma = 2\pi \times 6.5$  THz, and  $\varepsilon_\infty = 1.0$  corrispondenti ai valori di Drude per l'oro<sup>3</sup>. b) la parte immaginaria e reale della permeabilità e della permittività si eguagliano nei pressi della frequenza di risonanza. c) comportamento dello strato dielettrico del caso a compreso tra due strati di vuoto<sup>3</sup>.

La figura sovrastante illustra ciò che si verifica quando la permeabilità magnetica assume lo stesso valore della permittività elettrica. Come si vede l'assorbimento è massima quando le parti immaginaria e reale della permeabilità e della permittività assumono il medesimo valore.

In presenza di uno strato dielettrico chiuso su uno strato metallico l'assorbimento è massima laddove si eguagliano le parti immaginarie e reali di permeabilità e permittività, la trasmittanza resta nulla per via dello strato metallico mentre la riflettività si annulla in concomitanza della risonanza laddove l'impedenza dello strato va a raccordarsi con quella del vuoto.

La ragione per cui gli assorbitori perfetti sono approssimabili come tali soltanto in un ristretto range di frequenze si può spiegare facendo le seguenti considerazioni.

Riprendiamo il concetto di profondità di penetrazione definita come il percorso in cui l'intensità della radiazione elettromagnetica si riduce di  $1/e$

$$\delta = \frac{1}{2k}$$

È possibile inoltre scrivere l'equazione dell'oscillatore lorentziano come somma di una componente immaginaria ed una reale:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon'_1 + i\varepsilon'_2 = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma_e\omega)^2} + i \frac{\omega_p^2\gamma_e\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma_e\omega)^2}$$

La profondità di penetrazione delle onde elettromagnetiche può perciò essere scritta anche come<sup>16</sup>

$$\delta = \frac{1}{2k} = \frac{c}{2\omega\varepsilon'_2}$$

Ciò spiega la ragione del ristretto range di funzionalità del dispositivo assorbente. Difatti per uno strato materiale magneto dielettrico la precedente relazione indica come l'assorbanza sia massima laddove sono massime le perdite e ciò si verifica solamente in corrispondenza del massimo dell'oscillatore di Lorentz (figura 2b).

II), L'ultimo riquadro della figura (2c) si riferisce al caso successivo che verrà ora analizzato: uno strato dielettrico compreso nel vuoto, in questo caso la riflettività è nulla (con i parametri scelti, che sono i medesime del caso1) e la trasmittanza si annulla in corrispondenza della risonanza laddove diviene massimo l'assorbimento. Di seguito ecco il nuovo caso illustrato.

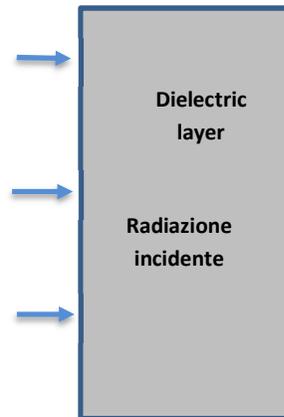


Figure 1.18: strato magnetodielettrico compreso tra due strati di vuoto

Lo strato dielettrico è compreso tra due strati di vuoto: in questo caso i coefficienti di riflessione assumono la forma<sup>3</sup>:

$$r = -\frac{i}{2} \left( Z_r + \frac{1}{Z_r} \right) \sin(nkd) \quad \text{et} \quad t = \frac{1}{\left[ \cos(nkd) - \frac{i}{2} \left( Z_r + \frac{1}{Z_r} \right) \sin(nkd) \right]}$$

Dove:  $R = |r|^2$ ;  $T = |t|^2$  et  $Z_r = \frac{Z}{Z_0}$

Utilizzando i medesimi parametri elettromagnetici del caso uno per lo strato dielettrico si verifica che:

$$R = 0; \quad T = e^{-2kd} = e^{-\frac{2dn\omega}{c}} \quad \text{in quanto } \omega = \frac{ck}{n} \rightarrow k = \frac{n\omega}{c}$$

Quanto scritto sta ad indicare che l'impedenza dello strato magneto-dielettrico è adattata a quella dello spazio libero. Da notare con riferimento alla figura 1.17 come in concomitanza delle condizioni di risonanza l'assorbimento sia maggiore del 99% sia per lo slab dielettrico compreso tra due strati di vuoto che nel caso di chiusura su un piano di massa metallico. Tale prestazione notevole in termini di assorbimento è però limitata fortemente ad una ristretta finestra di valori in

frequenza; al di fuori di tale fascia di valori si ha un immediato rialzo dei valori di riflettività per il caso 1 e della trasmittanza nel caso dello slab dielettrico compreso tra due strati d'aria.

## 1.10 Il ruolo delle perdite e dello spessore

Dopo aver studiato le condizioni di risonanza che spiegano il motivo per cui sotto determinate condizioni ad una fissata frequenza è possibile osservare dei picchi di assorbimento quasi unitari viene qui esposto brevemente il ruolo che hanno le perdite e lo spessore del materiale dielettrico. Del resto anche il termine  $kd$  che compare nella trasmittanza indica l'attenuazione dell'onda elettromagnetica, facendo entrare in gioco il ruolo dei fattori dissipativi. A tal riguardo la seguente figura evidenzia il ruolo che spessore e perdite giocano nell'assorbimento.

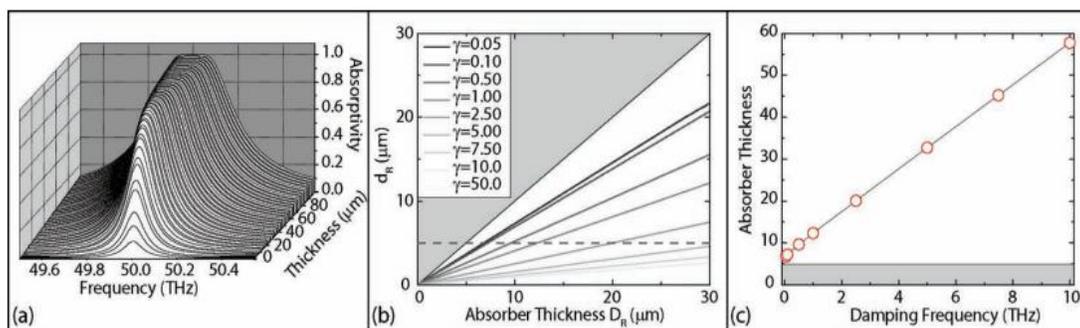


Figure 1.19: Il riquadro a rappresenta il trend dell'assorbimento al variare della frequenza, tenendo conto dello spessore dello slab dielettrico; si evince come l'assorbimento cresce oltre i 20  $\mu\text{m}$ , mentre resta piuttosto bassa per valori inferiori a tale soglia. L'illustrazione centrale mostra il trend del secondo termine dell'equazione di Kramers Kronig, variando la frequenza di smorzamento (damping frequency). Il riquadro destro mette in evidenza come varia lo spessore dell'assorbitore in termini della frequenza di smorzamento. La zona grigia è la regione proibita in conformità al limite di Rozanov<sup>3,24,25</sup>.

I grafici mostrati in figura sono stati ottenuti inserendo i parametri di Drude-Lorentz utilizzati per lo slab dielettrico dell'esempio precedente. Risalta subito che anche in condizioni di risonanza per spessori molto ridotti risulta essere basso l'assorbimento anche in condizioni di risonanza. Al crescere dello spessore dello slab dielettrico, come questo raggiunge i 20  $\mu\text{m}$ , anche la curva d'assorbimento sale rapidamente e per  $\omega=\omega_0$  si ottiene nuovamente il comportamento da assorbitore perfetto. Aumentando ulteriormente lo spessore alla fine l'assorbimento comincia a crescere in larghezza di banda. Il significato dei riquadri b e c della fig. 1.19 verrà chiarito a breve.

La relazione che fissa il legame tra spessore, bandwidth interessata e più basso valore possibile di riflettività  $R_0$  è la seguente:

$$B = 2 \left| \frac{\omega - \omega_0}{\omega} \right| \cong 2 \frac{4R_0}{\omega d |\mu_r - \epsilon_r|}$$

Mentre un più generale e completo legame tra lo spessore dell'assorbitore elettromagnetico e lo spessore dello slab dielettrico è dato dalla relazione:

$$D_R \geq \frac{1}{2\pi^2 \mu_S} \left| \int_0^\infty \ln|r(\lambda)| d\lambda \right| = d_\gamma$$

Tale formula deriva dalle relazioni di Kramers-Kronig<sup>22,23</sup> e mette in diretta relazione l'assorbimento elettromagnetico e lo spessore dello strato dielettrico ed è valida in condizioni di incidenza normale. In termini pratici l'equazione sopra scritta enuncia quali devono essere le dimensioni minime di un assorbitore in relazione allo spessore dello slab dielettrico tenendo conto della relazione di Kramers-Kronig. Il riquadro b della figura 1.19 mostra la variazione del termine destro dell'equazione di Kramers-Kronig in funzione dello spessore base dell'assorbitore, utilizzando i medesimi parametri dei grafici precedenti, ma variando la frequenza di smorzamento  $\gamma$ ; il riquadro c come deve variare lo spessore dell'assorbitore elettromagnetico, al variare della frequenza di smorzamento: si nota una netta crescita all'aumentare di  $\gamma$ . Tale trend è stato ricavato fissando a 5  $\mu\text{m}$  lo spessore fondamentale limite e lasciando invariati gli altri parametri; la zona grigia è una zona proibita descritta dal limite di Rozanov, che fissa la dimensioni minime che può avere un assorbitore<sup>24,25</sup>.

## 2 L'ASSORBITORE DI LANDY

### 2.1 Struttura dell' assorbitore di Landy

L'assorbitore di Landy è un dispositivo a metamateriale costituito da uno slab dielettrico di materiale FR4 di spessore 0.65 mm, sulle cui superfici top e bottom (designate così rispetto alla direzione di propagazione delle onde elettromagnetiche, top la prima superficie intercettata dalle onde e.m. e bottom la seconda superficie dove fuoriesce l'onda e.m. trasmessa) sono depositate delle inclusioni metalliche in rame. Sul lato top è presente un risonatore quadrato con due split che funzionano da capacità ed un conduttore centrale, mentre sul lato bottom è presente una strip metallica. La figura sottostante illustra forma, geometria e dimensioni del lato top e down.

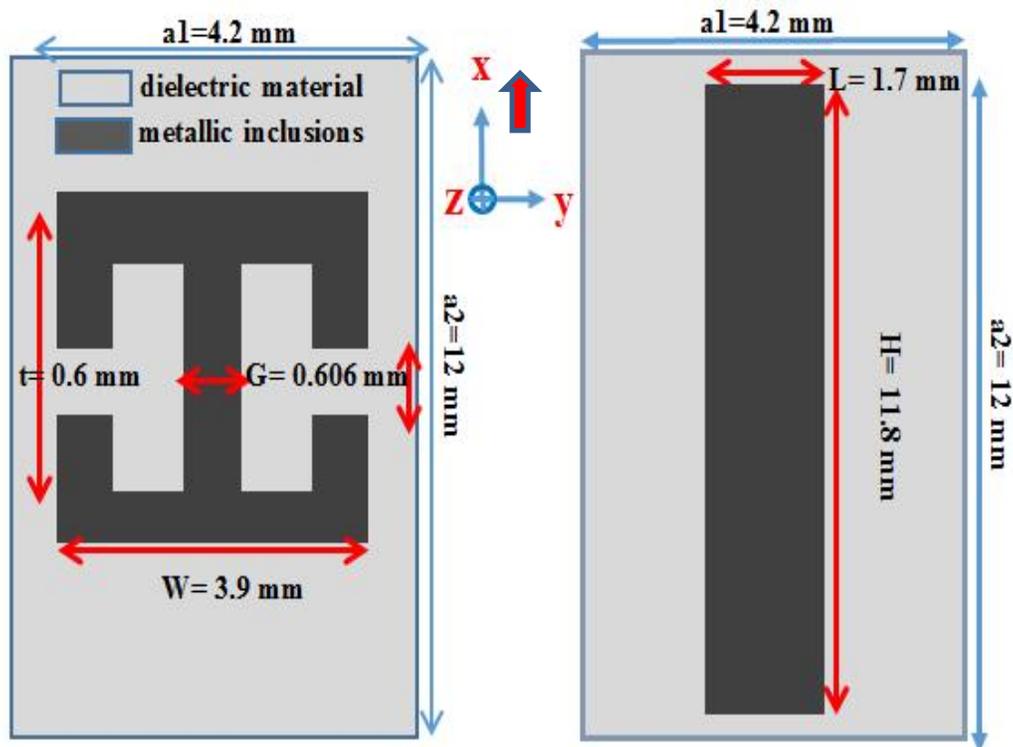


Figura 2.1: struttura in termini di geometria e dimensioni delle inclusioni metalliche. Lo square ring resonator è sul lato top ove arriva la radiazione incidente, la strip sul lato ove passa l'onda trasmessa (bottom della cella).

Le inclusioni metalliche sono in rame ed hanno uno spessore di 17 micrometri. La distanza tra la superficie top e down ove sono depositate le inclusioni metalliche è di 0.65 mm e tale valore corrisponde anche allo spessore del dielettrico compreso tra le due superfici. Il dielettrico consiste di FR4 che con un valore della epsilon dielettrica valutabile in  $3-i*0.06$  riproduce i risultati di assorbanza sia in frequenza che angolari consistenti con quanto riportato nell'articolo di Landy. Il software di simulazione utilizzato per riprodurre il dispositivo e il suo comportamento è Comsol Mutiphysics 4.4, un software che presenta un' implementazione versatile adatta per fare studi di tipo termico, elettromagnetico, meccanico e termodinamico. Ai fini del lavoro presentato in questa tesi è stato utilizzato il modulo elettromagnetico RF del programma Comsol Multiphysics. Comsol Multiphysics consente di costruire dispositivi di diversa forma e complessità che possono poi essere modificati sia agendo sulla geometria della cella che sui parametri della radiazione incidente (frequenza, angolo di incidenza, condizioni al contorno)<sup>26</sup>.

La figura precedente mostra la forma e le dimensioni della cella primitiva. Le dimensioni sono espresse in mm. Il sistema di riferimento cartesiano consente di identificare l'orientamento nello spazio. La sezione del parallelepipedo ove è posta la cella primitiva misura 4.2 mm x 12 mm. Sulla faccia top dello slab dielettrico il lato del risonatore quadrato misura 3.9 mm, mentre per quel che concerne la larghezza delle inclusioni metalliche del risonatore quadrato questa è pari a 0.60 mm. I gap dei tagli del risonatore quadrato che lavorano come capacità sono pari a  $G=0.606$  mm.

Sulla superficie bottom (superficie inferiore dello slab posta più lontano dal punto di irradiazione delle onde elettromagnetiche) è invece presente una strip metallica con dimensioni pari a 1.7 mm x 11.8 mm. Alle inclusioni metalliche sono state applicate delle condizioni di transizione che consentono di rendere più realistica la simulazione numerica.

La struttura complessiva della cella primitiva di metamateriale ove è stato svolto lo studio è la seguente (vista in prospettiva di lato sul piano z,y):

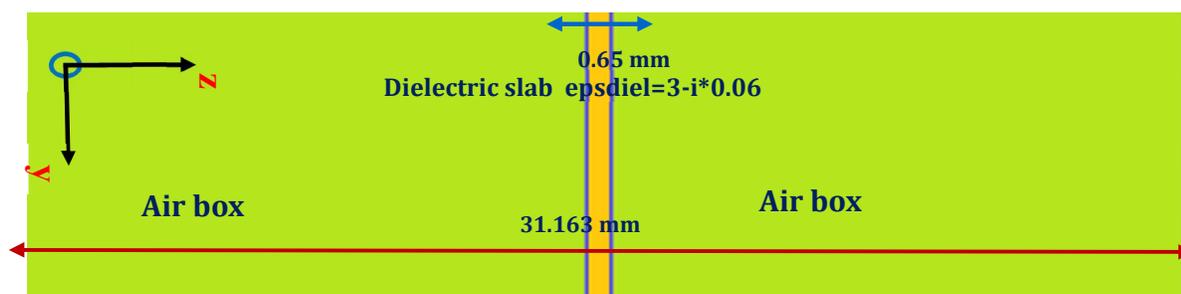


Figura 2.2 cella elementare del dispositivo di Landy vista di lato. Lo slab dielettrico con permittività elettrica pari a  $3-i*0.06$  e spessore  $0.65$  mm è compreso tra due strati d'aria (colorazione verde). La radiazione si propaga nel verso positivo delle  $z$ . Il dielettrico è in giallo arancio. Complessivamente il parallelepipedo che contiene ogni singola cella presente un'altezza pari a  $31.163$  mm

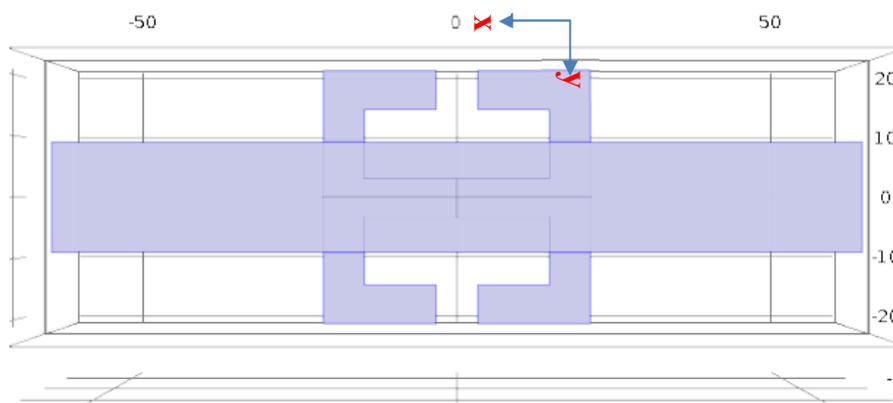


Figura 2.3 cella primitiva del dispositivo di Landy vista dal basso sfruttando la proprietà di trasparenza di Comsol. Si noti la strip metallica e il risonatore quadrato sul lato top della cella. La struttura è centrata-

La cella metamateriale è stata inserita tra due strati di aria le cui dimensioni sono  $(31.163-0.65)/2=15.26$  mm. Lo spessore del dielettrico in giallo arancio è come indicato  $0.65$  mm. Sulle superfici laterali è stata applicata la condizione di periodicità di Floquet (piani  $y-z$ ,  $x-z$ ) per simulare un comportamento simile a quello di un piano infinito, mentre per le inclusioni metalliche sono state applicate le condizioni di transizione con conduttività  $5.998e7$  S/m<sup>27</sup>.

## 2.2 Risposta in polarizzazione TE

Lo studio del comportamento del dispositivo metamateriale è stato fatto ricorrendo all'utilizzo di onde piane con direzione di propagazione nella direzione positiva dell'asse  $z$ . L'onda è di tipo TE con il campo elettrico orientato lungo l'asse  $x$ , parallelo al conduttore centrale (polarizzazione

lineare lungo x). Con il software Comsol si è svolto dapprima uno studio in frequenza ossia uno sweep tra 8 e 16 GHz in condizioni di incidenza normale e successivamente uno studio angolare in corrispondenza della frequenza in cui si manifesta il massimo assorbimento (frequenza di risonanza). I parametri che sono stati studiati e graficati sono l'assorbanza  $A(\omega)$ , la trasmissione  $T(\omega)$  e la riflettanza  $R(\omega)$ . Tra assorbanza, riflettività e trasmittanza viggono le seguenti relazioni:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad \text{con} \quad T(\omega) = |S_{21}|^2 \quad \text{e} \quad R(\omega) = |S_{11}|^2$$

In corrispondenza della risonanza  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$   $A(\omega) \rightarrow 1$  con  $T(\omega)$  e  $R(\omega) \rightarrow 0$ . È questa quella che viene designata come frequenza di lavoro del perfetto assorbitore metamateriale, un valore puntuale in frequenza in corrispondenza del quale il dispositivo manifesta un picco di assorbimento. Tipicamente la percentuale di energia assorbita declina rapidamente discostandosi dalla frequenza  $f_0$  e mutando le condizioni di incidenza. Nel caso specifico l'assorbitore di Landy contiene una frequenza di risonanza in assorbimento all'interno della banda X che declina rapidamente sia cambiando la frequenza che variando l'angolo di incidenza (tale struttura funziona con condizioni di incidenza normale). L'onda elettromagnetica è stata eccitata nella direzione positiva delle z. Si tratta di un'onda piana con polarizzazione lineare lungo l'asse delle x, quindi con campo elettrico orientato secondo l'asse x, parallelo al conduttore centrale e con espressione  $E_x = \exp(-i \cdot k_{ay} y)$  V/m;  $k_{ay}$  denota la componente in aria lungo l'asse delle y del vettore d'onda che in condizioni di normalità diventa nullo facendo divenire unitario il campo elettrico lungo l'asse delle x. Ponendoci in tali condizioni che sono quelle riportate nell'articolo sul dispositivo metamateriale di Landy tramite Comsol si perviene alla seguente situazione:

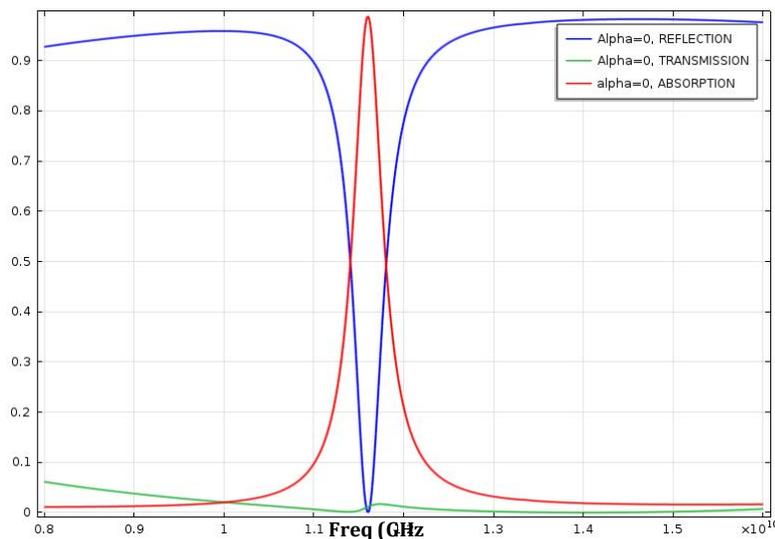


Figura 2.4 Curve di assorbimento (rosso), trasmissione (verde) e riflessione (blu) del dispositivo MTM di Landy al variare della frequenza tra 8 e 16 GHz. È presente una risonanza a 11.60 GHz. Lo sweep è stato svolto in condizioni di incidenza normale con polarizzazione TE.

Lo studio è stato svolto utilizzando onde elettromagnetiche piane nella banda X effettuando uno sweep in frequenza tra 8 e 16 GHz, con angolo di incidenza nullo (incidenza normale). Il grafico di output della simulazione riporta in rosso l'assorbimento, in verde la trasmittanza ed in blu la riflettanza. In ascissa è presente la frequenza in GHz. È chiaramente evidente una risonanza di assorbimento ad 11.60 GHz ed un assorbimento del 98.84% in corrispondenza di tale valore in frequenza. Tali valori sono consistenti con quanto riportato in letteratura dove si indica per la frequenza di lavoro un valore di 11.65 GHz ed un assorbimento del 99%. Per il dispositivo di Landy. Si nota anche come la trasmissione dell'onda risulti molto bassa per tutto l'intervallo di frequenze considerato. L'assorbimento risulta invece molto piccato in corrispondenza della frequenza di risonanza, ma decresce molto rapidamente discostandosi anche di poco da tale valore. Ciò è in accordo con il funzionamento tipico della maggioranza degli assorbitori metamateriali che esibiscono valori molto alti di assorbimento ma per specifiche frequenze e molto più raramente per intervalli più estesi (broadband frequency absorbers).

Tale comportamento è spiegato tramite il modello di Lorentz. La cella primitiva di un assorbitore metamateriale dotato di campo di slab dielettrico ed inclusioni metalliche è schematizzabile con quella di un circuito LC in prima approssimazione<sup>3,5,28</sup>. Per ottenere un assorbimento quasi unitario e quindi una bassissima riflessione è necessario che l'impedenza complessiva del dispositivo

metamateriale si adatti a quello dello spazio vuoto e tale circostanza si verifica solamente quando l'epsilon dielettrica relativa del dispositivo diventa uguale alla permeabilità magnetica <sup>2,3,28,29</sup>.

Ossia deve verificarsi la condizione:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = 1$$

A garantire tale situazione sono le risposte elettriche del dispositivo generate dal risonatore e dalla strip metallica che si accoppiano con il campo elettrico della radiazione incidente per un certo valore della frequenza (risonanza). La risposta magnetica è invece determinata dalle correnti antiparallele che si sviluppano sul conduttore centrale del risonatore e sulla strip metallica.

La frequenza di lavoro può essere spostata scalando le dimensioni della cella primitiva, mentre la forma geometrica influenza soprattutto l'entità dell'assorbimento <sup>3,28</sup>. Questo perchè cambiare forma e dimensioni delle parti metalliche significa agire sulle capacità ed induttanze equivalenti, a ragione della schematizzazione in circuiti LC di tali strutture elettromagnetiche<sup>3,28,30,31,32,33,34,35</sup>.

Dopo lo studio svolto in frequenza è stato successivamente impostato uno sweep angolare. Fissando la frequenza a 11.60 GHz, valore dove è stata riscontrata la risonanza d'assorbimento e facendo variare l'angolo di incidenza tra 0 e 90 gradi (lasciando invariati tutti gli altri parametri ed impostazioni) si è riscontrato il seguente comportamento:

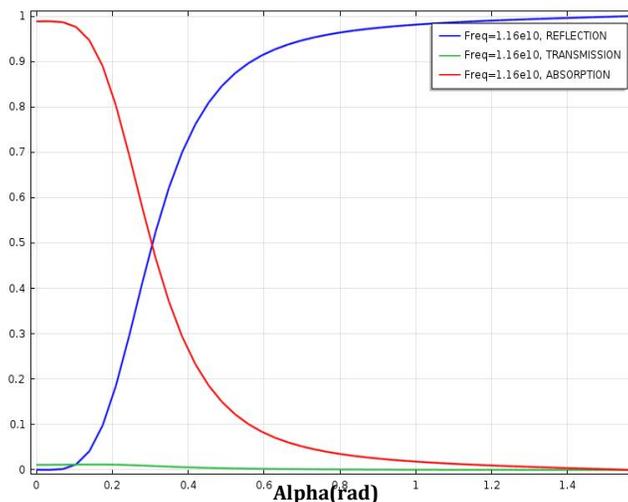


Figura 2.5 Risposta angolare dell'assorbitore MTM di Landy. L'angolo di incidenza della radiazione elettromagnetica è stato fatto variare tra 0 e 90 gradi, fissando la frequenza a 11.60 GHz, dove si riscontra la presenza di una risonanza di assorbimento. Il piano di incidenza è yz, mentre la polarizzazione dell'onda e.m. è TE. La scala riportata è in radianti sull'asse orizzontale. Si nota il rapido declino dell'assorbimento all'aumentare dell'angolo di incidenza.

Lo studio è stato effettuato lungo il piano d'incidenza yz in polarizzazione di tipo TE con il campo elettrico disposto lungo l'asse delle x. Sul programma Comsol l'analisi è stata svolta in corrispondenza della risonanza individuata. Come per il grafico precedente la linea rossa denota l'assorbanza, il verde la trasmittanza e il blu la riflettanza. In ascissa l'angolo è in radianti. La trasmissione resta bassa per tutto lo sweep, mentre il comportamento della linea rossa denota come l'assorbimento del dispositivo sia marcato solamente per angoli molto piccoli. Al crescere dell'angolo d'incidenza la frazione di potenza assorbita declina rapidamente seguendo un andamento a sigmoide. A 0.3 radianti (poco più di 17 gradi) l'assorbanza è già ridotta a 0.50 per ridursi a meno del 10% attorno ai 35 gradi. Anche nell'articolo di Landy si riscontra il medesimo comportamento con picco per incidenza normale seguito da declino rapido all'aumentare dell'angolo di incidenza. Tuttavia nell'articolo originale l'entità del declino riportata è ancora più netta con assorbanza ridotta già al 20% a circa 13 gradi<sup>2</sup>. Ciò però non cambia la validità del modello riprodotto su Comsol Multiphysics in quanto la risonanza di assorbimento si verifica per un valore della frequenza compatibile con quanto riportato dalla letteratura ed il trend dell'assorbanza resta il medesimo. Ciò che potrebbe aver influito su tale discordanza sono alcuni dettagli sulle condizioni di simulazione. Benché infatti vengano riportate le caratteristiche generali forma e dimensioni del dispositivo, spessore dello strato dielettrico e disposizione del campo elettrico non si hanno informazioni sul valore della epsilon dielettrica dello slab in FR4 che

è stimata perchè non indicata esplicitamente. Tale dettaglio potrebbe quindi spiegare la leggera discrepanza di quanto ottenuto dalla simulazione numerica impostata su Comsol con quanto riportato nel lavoro di Landy. Cio' comunque non toglie validita' al modello implementato, il quale riproduce i risultati fondamentali del dispositivo originale (comportamento in frequenza e trend angolare della curva di assorbimento). Per completezza il grafico seguente illustra le risposte in frequenza ed angolari del dispositivo di Landy:

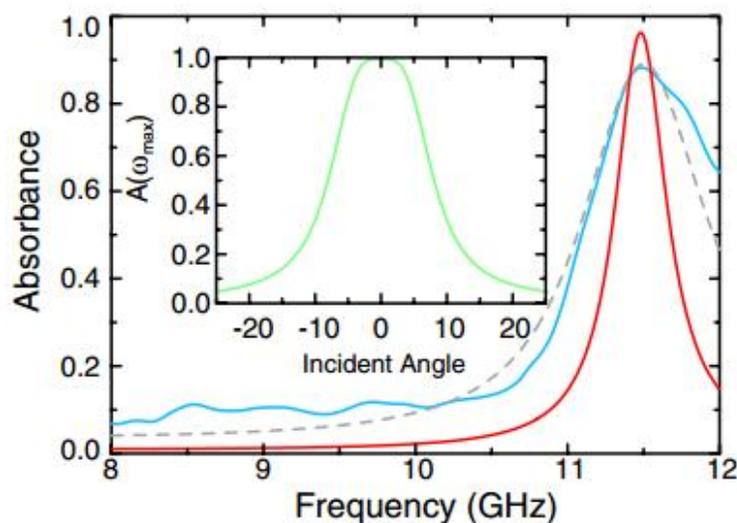


Figura 2.6. comportamento dell'assorbitore di Landy così come riportato dall'articolo originale di Landy, 2008. La linea a tratto rosso è l'assorbanza al variare della frequenza in banda X, mentre la linea verde dentro il riquadro interno più piccola mostra il comportamento della medesima al variare dell'angolo.

Come si nota si conferma un buon funzionamento dell'assorbitore solamente per un preciso valore della frequenza e per piccoli angoli di incidenza. E come spiegato nei capitoli introduttivi e' questo spesso un limite che si presenta nella funzionalità dei dispositivi assorbitori a metamateriale: la ristretta funzionalità in frequenza e in angolo di incidenza.

### 2.3 Risposta in polarizzazione TM

Prima di proseguire con le modifiche che hanno condotto alla realizzazione del wide angle absorber è stato svolto un ulteriore studio in polarizzazione TM. Con tale tipo di polarizzazione il dispositivo di Landy non presenta risonanze d'assorbimento tra 8 e 16 GHz. La simulazione è stata

implementata orientando lungo l'asse x, parallelamente al conduttore centrale, il campo magnetico  $H=\exp(-i*k_{ay}y)$  e si è così pervenuti al seguente risultato, in condizioni di incidenza normale:

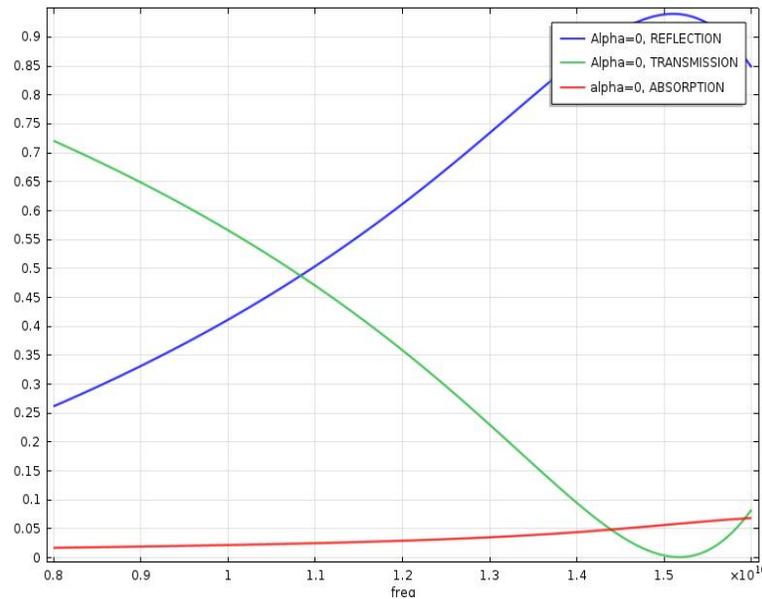


Figura 2.7. risposta dell'assorbitore di Landy in banda X in condizioni di incidenza normale utilizzando onde TM. Non si riscontrano frequenze di risonanza in tale intervallo di frequenze.

Questo ulteriore test è stato effettuato in quanto la struttura dell'assorbitore non è simmetrica e si è così vista la differenza di comportamento sostituendo il campo elettrico con quello magnetico lungo l'asse delle x. Le linee a tratto rosso definisce l'assorbimento, il verde la trasmissione ed il blu la riflessione. In ascissa per lo sweep in frequenza l'unità di misura è il GHz. Si conclude chiaramente che in polarizzazione TM il dispositivo di Landy nelle frequenze 8-16 GHz non presenta risonanze d'assorbimento e non funziona come assorbitore. Tale comportamento circoscrive ancor più il funzionamento dell'assorbitore che funziona da perfetto assorbitore solamente per una singola frequenza, in condizioni di incidenza normale ed in presenza di polarizzazione TE.

## 3. II WIDE ANGLE METAMATERIAL ABSORBER

### 3.1 Premessa

Obiettivo di questo lavoro di tesi e' la progettazione di assorbitori metamateriali. Nel caso specifico una volta riprodotto l'assorbitore di Landy sul simulatore Comsol, si e' considerata tale struttura come un modello di partenza su cui poi progettare e costruire nuovi dispositivi che migliorino le prestazioni osservate.

A tal proposito sono state fatte diverse simulazioni modificando i parametri iniziali della struttura di Landy come cambiamenti della geometria, delle dimensioni, della polarizzazione delle onde elettromagnetiche e del numero di strati. Alcune configurazioni intermedie analizzate prima di arrivare alla struttura finale individuata presentavano o notevole complessita' costruttiva o risultati si discreti, ma inferiori a quelli del dispositivo di riferimento. Alla fine, tenendo conto delle caratteristiche generali degli assorbitori metamateriali e dei parametri oggetto degli sweep di prova (larghezza delle inclusioni metalliche, disposizione del risonatore all' interno della cella primitiva, gap degli split) si e' individuata una struttura che presenta un'architettura relativamente semplice e non molto diversa dall'assorbitore di Landy, ma che manifesta un notevole incremento dell'assorbimento angolare.

### 3.2 Struttura del wide angle absorber

In base alla teoria dei metamateriali le risonanze d'assorbimento sono ottenute agendo sull'impedenza del dispositivo stesso. Occorre quindi influenzare i valori delle capacita' e delle induttanze associate alle inclusioni metalliche per ottenere dei risultati in termini di prestazioni. Si e' quindi agito sulla geometria delle inclusioni metalliche in particolare del risonatore quadrato che e' il principale responsabile del posizionamento della frequenza di risonanza e soprattutto della sua profondita' (entita' dell'assorbimento)<sup>36,37</sup>.

Scopo di tali modifiche e' la progettazione di un nuovo assorbitore MTM che presenti un assorbimento piu' ampio in frequenza o variando l'angolo rispetto al risonatore di Landy. Per quel

che riguarda l'assorbimento in banda non si sono raggiunte prestazioni migliori in merito. L'assorbimento, sebbene deciso, e' rimasto fortemente piccato in frequenza con un calo notevole dell'assorbanza allontanandosi dalla frequenza di lavoro.

Interessanti risultati sono stati invece osservati per quel che riguarda l'estensione angolare dell'assorbimento in polarizzazione TE (wide angle absorber). Di seguito è presentato uno schema del nuovo dispositivo elaborato tramite Comsol Multiphysics

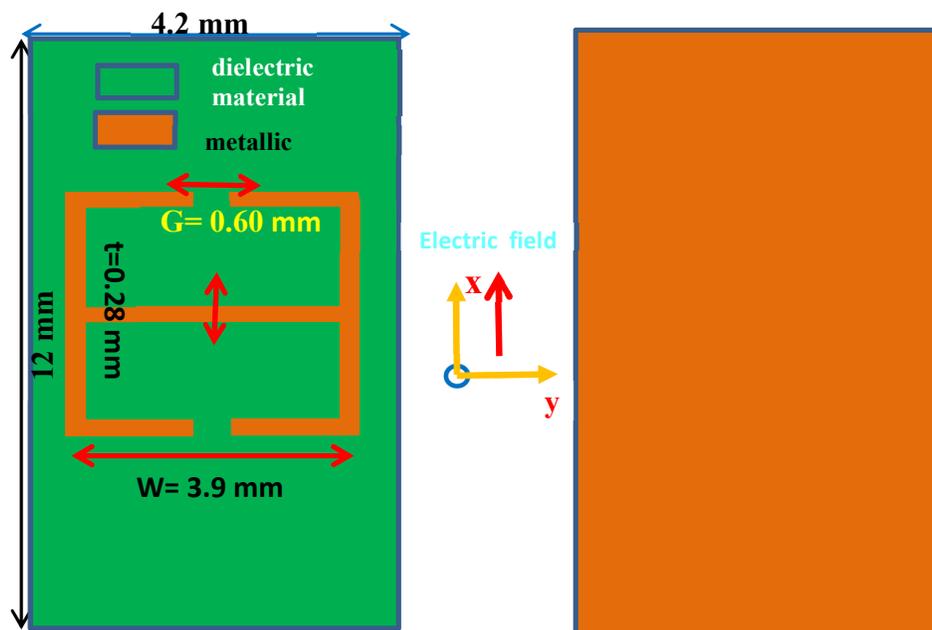


Figura 3.1. struttura della cella primitiva del wide angle absorber. Sulla superficie top è presente un risonatore quadrato, i cui split sono ruotati di 90 gradi rispetto alla direzione del campo elettrico. Le dimensioni geometriche sono riportate in mm. In verde è riportato il substrato dielettrico, in arancione le inclusioni metalliche in rame. Si noti come la superficie bottom posta a destra della figura sia ricoperta completamente dal rame (piatto metallico)

La precedente figura mostra la nuova struttura. La lunghezza dei lati del risonatore quadrato resta la medesima dell'assorbitore di Landy così come le dimensioni della cella primitiva. Ciò che si va a modificare è invece:

- la larghezza delle inclusioni metalliche in rame che passano da 0.60 a 0.28 mm e che vanno ad influire sull'induttanza del risonatore quadrato

- la rotazione del risonatore di 90 gradi che va a modificare l'orientamento del risonatore quadrato rispetto alla radiazione elettromagnetica incidente. Empiricamente in base alle simulazioni fatte, sebbene non si sia pervenuti ad un modello matematico che spieghi quanto ottenuto sembra essere questo il fattore chiave che determina l'allargamento dell'assorbimento angolare.
- Nel lato bottom del risonatore la strip metallica è sostituita da un piatto metallico sempre in rame che va a ricoprire tutta l'area della cella primitiva. Tale scelta si giustifica per l'effetto che tale configurazione ha sulla radiazione trasmessa. Questa viene annullata, rendendo trascurabile la trasmittanza. La modifica degli altri parametri pur incrementando l'assorbimento angolare tendevano a far aumentare il valore della trasmittanza. L'utilizzo del piatto metallico causa un effetto schermo (gabbia di Faraday) che annulla la radiazione trasmessa.
- Una piccola ottimizzazione è stata fatta anche nel gap dello split che è passato da 0.606 a 0.600 mm. Tale modifica ha avuto influenza sulla capacità del risonatore quadrato, rendendo più piccata la risonanza in frequenza.
- Infine il dielettrico utilizzato è ora un ARLON 450 con spessore 0.51 mm e valore di epsilon dielettrica pari a  $4.50 - i \cdot 0.06$ . La modifica del dielettrico e dello spessore usati è stata fatta nell'ottica di poter costruire fisicamente il dispositivo al fine di poterlo effettivamente testare. Ciò ha portato alla simulazione del dispositivo basandosi anche sugli standard commerciali disponibili. A sua volta il cambio dei materiali utilizzati ha influito sui valori assunti dai parametri modificati descritti in precedenza.
- Non sono invece cambiate le condizioni periodiche utilizzate nella simulazione numerica e le dimensioni della cella primitiva. Inoltre il risonatore resta centrato geometricamente. Di seguito sono mostrate due ulteriori prospettive della singola cella del dispositivo nello spazio:

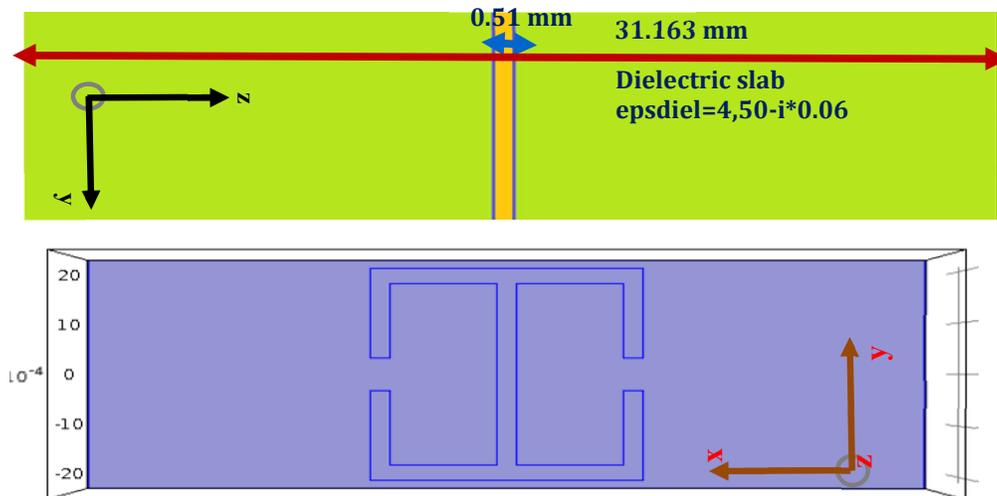
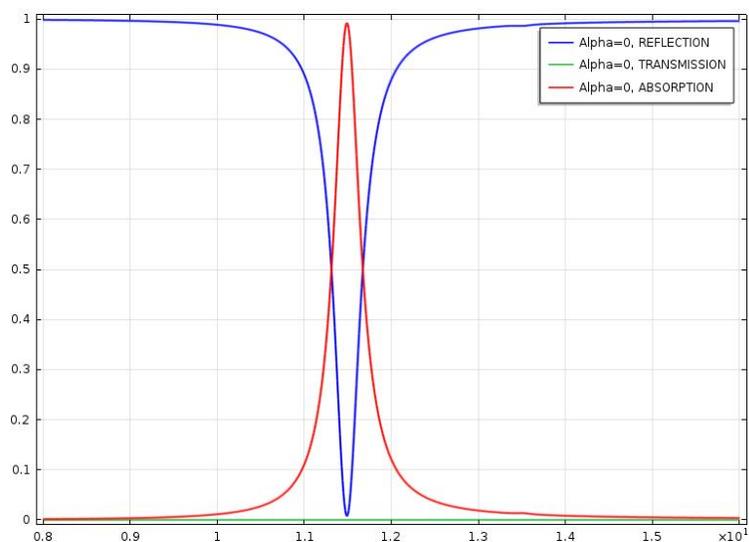


Figura 3.2 struttura e disposizione nello spazio della cella primitiva del wide angular absorber. In alto una prospettiva di lato; la cella è modellizzata come un parallelepipedo di lunghezza 31.163 mm. Le inclusioni metalliche sono depositate sulle superfici top e bottom dello slab dielettrico dallo spessore di 0,51 mm (colorazione gialla) con epsilon dielettrica pari a  $4.50-i*0.06$ . In basso vista del lato top della cella; è visibile il risonatore quadrato disposto sulla superficie top dello slab.

Come si vede lo slab dielettrico che presenta ora uno spessore di 0.51 mm è inserito con struttura centrata tra due parallelepipedi di aria con epsilon unitaria dalle dimensioni ciascuno di 12 mm x 4.2 mm x 15.33 mm. Sul top dello slab il risonatore quadrato è ora ruotato di 90 gradi con i gap disposti lungo l'asse delle y, mentre il campo elettrico sarà imposto lungo l'asse delle x.

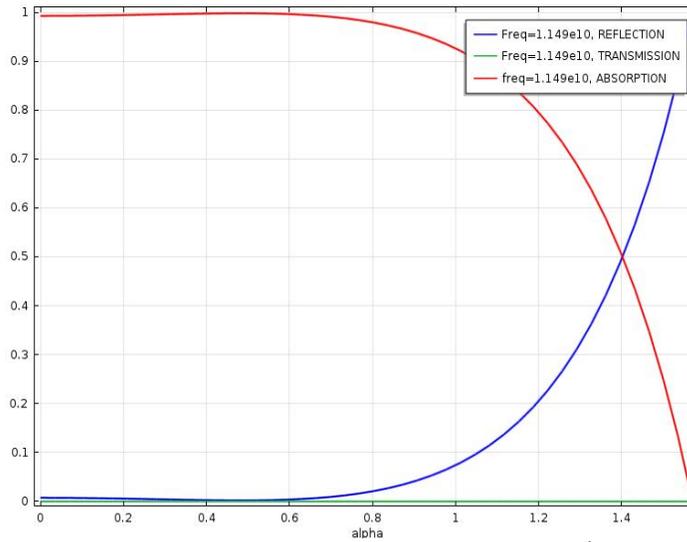
### 3.3 Comportamento del wide angle absorber in polarizzazione TE

Dopo aver presentato la struttura fisica del nuovo dispositivo vengono di seguito mostrate le sue prestazioni ripetendo le stesse simulazioni numeriche effettuate in frequenza in condizioni di incidenza normale e successivamente variando l'angolo dopo aver individuato la frequenza di risonanza. L'onda, di tipo piano e TE, è stata eccitata con vettore d'onda  $k$  lungo l'asse z e con il campo elettrico orientato lungo l'asse x con  $E_x = \exp(-i*k_a*y)$  orientato perpendicolarmente al conduttore centrale.



*Figura 3.3. Risposta in frequenza dell'assorbitore wide angular absorber: si noti la risonanza di assorbimento ad 11.49 GHz. In azzurro è rappresentata la riflettanza, in rosso l'assorbimento ed in verde la trasmissione. Lo sweep in frequenza è stato svolto in condizioni di incidenza normale.*

Lo sweep in frequenza è stato effettuato tra 8 e 16 GHz. Il picco d'assorbimento (linea rossa) è stato individuato in corrispondenza di 11.49 GHz. Si riscontra un assorbimento che è circa il 99%. Da questo punto di vista non cambia il comportamento rispetto a quello che si osservava con il dispositivo di Landy: ossia un notevole picco di assorbimento, fortemente limitato in frequenza con rapido declino della radiazione assorbita all'allontanarsi dalla frequenza di lavoro. La frequenza di risonanza continua a ricadere in banda X. A questo punto è stato impostato uno sweep angolare tra 0 e 90 gradi con step di 2 gradi (piano di incidenza yz), mantenendo l'onda con campo elettrico orientato lungo l'asse delle x (onda TE con campo elettrico ortogonale al conduttore centrale) e fissando la frequenza proprio a 11.49 GHz. Il risultato di questa ulteriore simulazione numerica è stato il seguente:



*Figura 3.4. sweep angolare, fissando la frequenza ad 11.49 GHz. È evidente un forte assorbimento angolare fino ad elevati valori dell'angolo di incidenza (linea rossa). La trasmissione (tratto verde) resta quasi nulla per via del piatto metallico che ricopre il bottom della cella. Il piano di incidenza è yz, la polarizzazione TE.*

Rispetto al caso precedente si nota un netto incremento dell'assorbanza angolare fino a circa 70 gradi, soltanto per grandi angoli si evince un rapido declino della potenza assorbita. L'incremento dell'assorbimento per grandi angoli rispetto all'assorbitore iniziale è quindi palese e notevole. La figura sottostante riporta un confronto diretto tra l'assorbanza del dispositivo di Landy e quella del nuovo assorbitore a grandi angoli (wide angle absorber). Il grafico è stato ottenuto tramite KaleidaGraph.

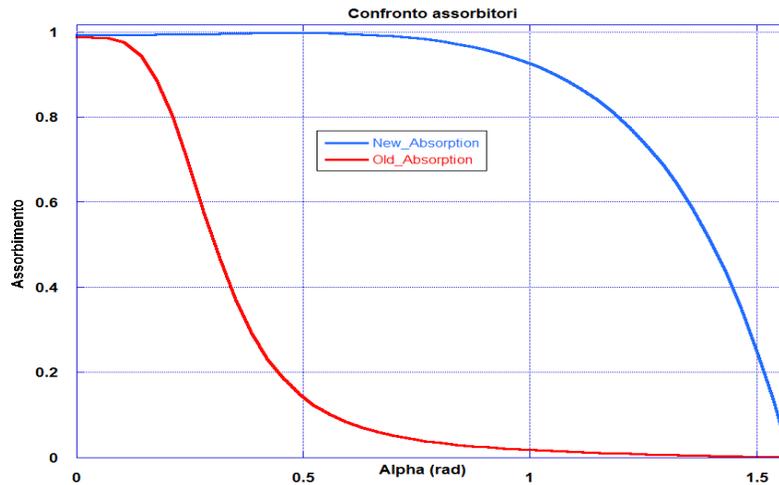


Figura 3.5. Confronto tra l'assorbanza angolare del wide angle absorber (linea blu) e quello del dispositivo di Landy (linea rossa)

L'assorbitore wide angle comporta un netto incremento della percentuale di radiazione assorbita: a 60 gradi l'assorbanza è maggiore del 90% mentre a 68 gradi si aggira sull'80%. Il limite di tale dispositivo è dato dal fatto che tale efficienza vale solo per un preciso e puntuale valore in frequenza. Inoltre risonanza ed assorbimento sono presenti solo con polarizzazione TE.

### 3.4 Comportamento del wide angle absorber in polarizzazione TM

Come per il dispositivo assorbitore di Landy, anche per il wide angle absorber è stato implementato lo studio in polarizzazione TM. Non essendo simmetrica la geometria nelle due direzioni dello spazio, si è dapprima impostato uno studio in incidenza normale, un'onda TM ma con il campo magnetico orientato lungo l'asse delle x, (scelto con il criterio precedente),  $H_x = \exp(-i*k_{ay}y)$ , lasciando immutate tutte le altre condizioni. In tal modo si è osservato il seguente comportamento:

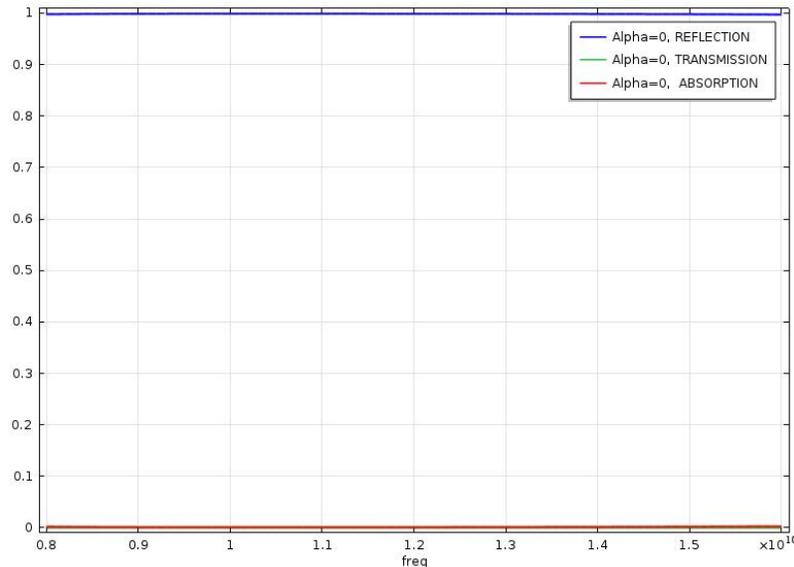


Figura 3.6. Risposta in frequenza dell'assorbitore wide angular absorber in TM polarizzazione. Il nuovo dispositivo si comporta come un perfettamente riflettente con questo tipo di polarizzazione

Sostanzialmente nella banda compresa tra 8 e 16 GHz in polarizzazione TM il dispositivo si comporta come perfettamente riflettente. Ciò implica anche nel caso in esame una circoscrizione del funzionamento dell'assorbitore perfetto in relazione al tipo di polarizzazione considerata. Riassumendo le principali qualità ottenute tramite simulazione numerica e facendo un raffronto con il dispositivo di Landy si conclude che:

- I. Entrambi i dispositivi esibiscono un forte assorbimento fino al 99% circa, in presenza di incidenza normale, ma per un valore puntuale della frequenza; esiste quindi una precisa frequenza di lavoro dove le strutture funzionano efficacemente ma tale proprietà decade immediatamente discostandosi dalla risonanza.
- II. Il vantaggio dell'assorbitore ottenuto ruotando di 90 gradi il risonatore e modificando alcuni parametri geometrici come la larghezza delle inclusioni metalliche è l'allargamento dell'assorbanza angolare da cui il nome del nuovo dispositivo.

- III. Sia per il **wide angle absorber** che per l'**assorbitore di Landy** il funzionamento come assorbitori vale solo per la polarizzazione di tipo TE, mentre per la polarizzazione TM tale comportamento sparisce. Anzi nel caso del dispositivo wide angle absorber compare un comportamento perfettamente riflettente.

### 3.5 Il problema della disponibilità dei materiali

Nel corso dello svolgimento del progetto di Dottorato si sono presentate diverse problematiche legate alle disponibilità di materiali secondo gli standard commerciali per poter costruire il dispositivo assorbitore ottenuto dalle simulazioni numeriche. Come già visto nel progetto dell'assorbitore per grandi angoli si è già tenuto conto dello standard Arlon disponibile che ha condizionato alcuni parametri per mantenere la risonanza all'interno della banda X. Successivamente si sono presentati ulteriori problemi legati allo spessore delle inclusioni metalliche in rame e al valore della costante dielettrica del materiale dielettrico con cui fabbricare lo slab disponibile. Dalla letteratura scientifica lo spessore del rame per l'assorbitore di Landy ammonta a circa 17 micrometri, mentre gli standard commerciali disponibili misurano 35 micrometri. Il dielettrico disponibile presenta invece una tangente di perdita di 0.0035 che si traduce in una epsilon immaginaria pari a 0.01575. Il valore aggiornato finale della epsilon dielettrica del materiale disponibile è quindi  $4.50 - i \cdot 0.01575$ .

A questo punto mantenendo inalterati gli altri parametri si è tenuto conto di questi ulteriori due fattori. Per quel che concerne il mutamento dello spessore del rame da 17 a 35 micrometri ciò non ha prodotto effetti; le simulazioni su Comsol Multiphysics hanno confermato la stessa qualità dei risultati osservati senza evidenziare alcun cambiamento. Diverso discorso, invece, per quanto si è constatato variando il valore della epsilon dielettrica. Come prevedibile la percentuale di radiazione assorbita è diminuita in conseguenza del calo del fattore di dissipazione, che si manifesta nel valore della componente immaginaria della permittività dielettrica del materiale. I grafici seguenti mostrano la risposta del dispositivo con i parametri nuovamente cambiati in base alle caratteristiche dei materiali reperibili (forma e dimensioni restano le stesse):

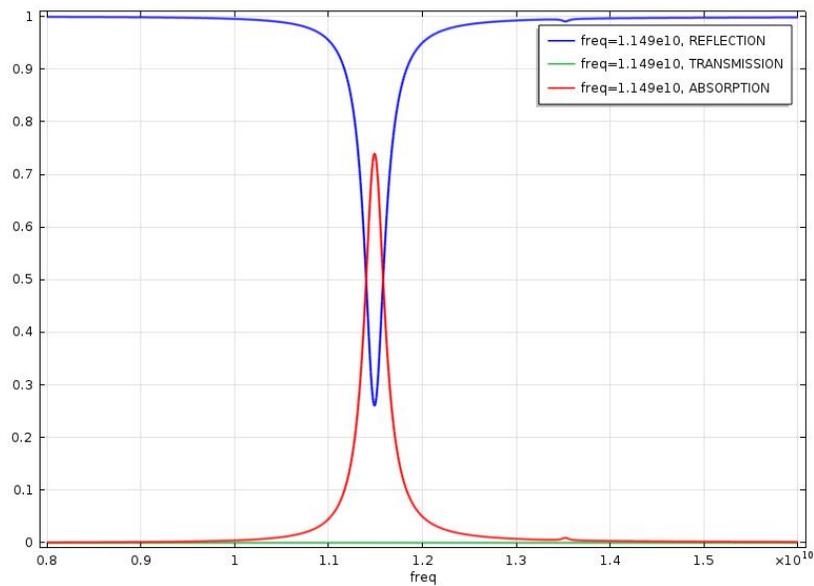


Figura 3.7 comportamento del wide angular absorber con una epsilon del materiale commerciale pari a  $4.50 - i * 0.01575$ . La risonanza resta ad 11.49 GHz, ma si perde in termini di percentuale di assorbimento (linea rossa), in favore di una maggiore riflessione (tratto blu)

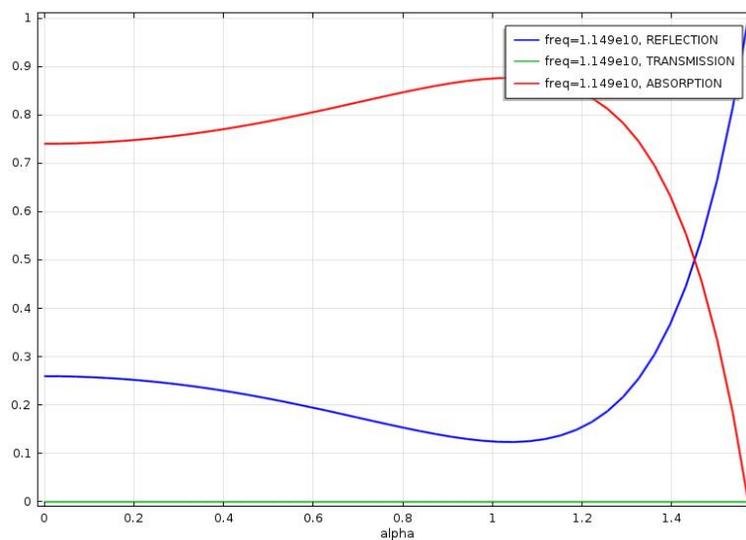


Figura 3.7. lo sweep angolare conferma l'estensione dell'assorbimento angolare ma ne decurta la percentuale sensibilmente.

Si nota immediatamente come il cambiato valore della parte dissipativa della epsilon dielettrica implichi un abbassamento della percentuale di radiazione elettromagnetica assorbita. La frequenza di risonanza resta ad 11.49 GHz, così come si mantiene invariata l'estensione angolare in cui è

rilevante l'assorbimento; tuttavia quest'ultimo si abbassa fino ad un valore del 25% per piccoli angoli per poi aumentare ma sempre sotto al 90% dopo i 50 gradi fino a raggiungere un massimo attorno ai 65 gradi. In definitiva viene a sparire il comportamento d'assorbitore perfetto che vedeva l'assorbanza avvicinarsi a valori quasi unitari fino a circa 60° e maggiori del 90% fino a 70°.

## 4. LE POSSIBILI SOLUZIONI: IL MODELLO A SVASTICA

### 4.1 premessa

Le difficoltà che si sono succedute nella reperibilità dei materiali dalle caratteristiche descritte nella simulazione che risulta più performante hanno creato l'esigenza di mutare ulteriormente lo schema dell'assorbitore iniziale così da poter realizzare un dispositivo che preservasse il più possibile le prestazioni osservate in sede numerica e che al contempo fosse realizzabile con i materiali commercialmente disponibili.

I tentativi sono stati molti e sono passati dalla variazione delle dimensioni di alcune parti del dispositivo, senza però variarne la geometria, per poi arrivare a dei cambiamenti della forma che di fatto hanno portato progressivamente a riprogettare il dispositivo finale con cui poter fare misure. Prima di presentare la forma finale (realizzata in collaborazione con il gruppo di ricerca) ed adattata secondo gli standard commerciali per poter fare misure sul campo verrà qui proposta una nuova soluzione che ha comportato, sebbene sempre a livello numerico, la conservazione di un elevato assorbimento angolare sia in polarizzazione TE ed anche l'estensione di tale effetto in polarizzazione TM. Tale modello di assorbitore presenta una geometria a svastica. Tale forma geometrica mostra un'elevata simmetria che si presta ad interessanti applicazioni in ottica<sup>38</sup>.

Prima di enunciare i risultati ottenuti da simulazione numerica elaborati tramite Comsol è possibile anticipare che proprio il progressivo aumento del grado di simmetria è il principale responsabile delle prestazioni ottenute in termini di assorbimento. Questo perchè le onde elettromagnetiche "vedono" le medesime strutture quanto in polarizzazione TE che TM. Inoltre sebbene il risonatore quadrato venga sostituito dalla svastica il resto delle caratteristiche si preservano. L'assorbitore a svastica è stato progettato sia con con cella primitiva a forma rettangolare che con forma quadrata.

## 4.2 Struttura dello swastiska absorber-caso cella primitiva a base rettangolare

Di seguito è mostrata la struttura dello swastiska absorber con le relative dimensioni:

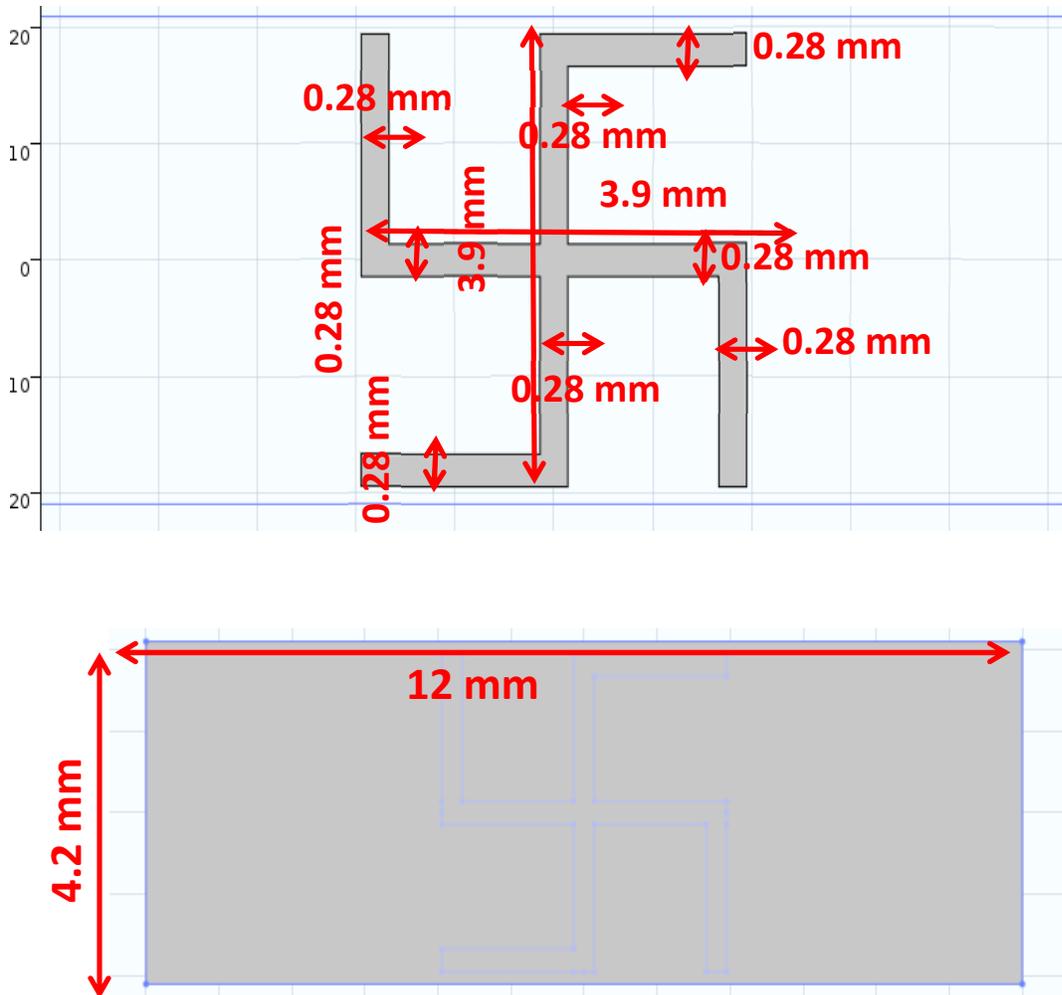


Figura 4.1: struttura della superficie top dell'assorbitore a svastica (riquadro in alto) e di quella bottom (riquadro in basso) ricoperta con un piatto metallico. Sono indicate le dimensioni in mm delle inclusioni metalliche.

La prima figura mostra il top dell'assorbitore a svastica. Le dimensioni della cella primitiva sono state mantenute invariate e ammontano a 4.2 x 12 mm. Come per l'assorbitore a grande angolo di

cui si è parlato sulla facciata bottom del dispositivo è stato lasciato il piano di massa, un piatto metallico che va a ricoprire quindi tutto il lato inferiore del dispositivo.

Le inclusioni metalliche come nel wide angle absorber progettato precedentemente mantengono una larghezza di 0.28 mm. Avendo simmetria quadrata i due principali assi della svastica presentano una misura equivalente a 3.9 mm, quindi pari alla misura del lato del risonatore quadrato. I lati della svastica misurano invece 2.09 mm (somma del semilato del quadrato più la metà della larghezza delle inclusioni). Il sistema è centrato, lo slab dielettrico contenuto tra i piani ove giacciono le inclusioni metalliche è 0.51 mm con epsilon dielettrica pari a  $4.50 - i \cdot 0.01575$ , il medesimo valore che nel caso del **wide angle absorber**, basato sul risonatore quadrato, ne ha abbattuto l'efficienza di assorbimento. Le inclusioni metalliche hanno uno spessore assegnato di 35 micrometri (le simulazioni numeriche finora eseguite non hanno evidenziato differenze nelle prestazioni degli assorbitori, in relazione allo spessore del rame).

Di seguito è rappresentata la struttura della cella primitiva da più prospettive:



Figura 4.2. immagine di lato con vista sul piano y della cella primitiva con riportata la dimensione dello spessore dello slab dielettrico.

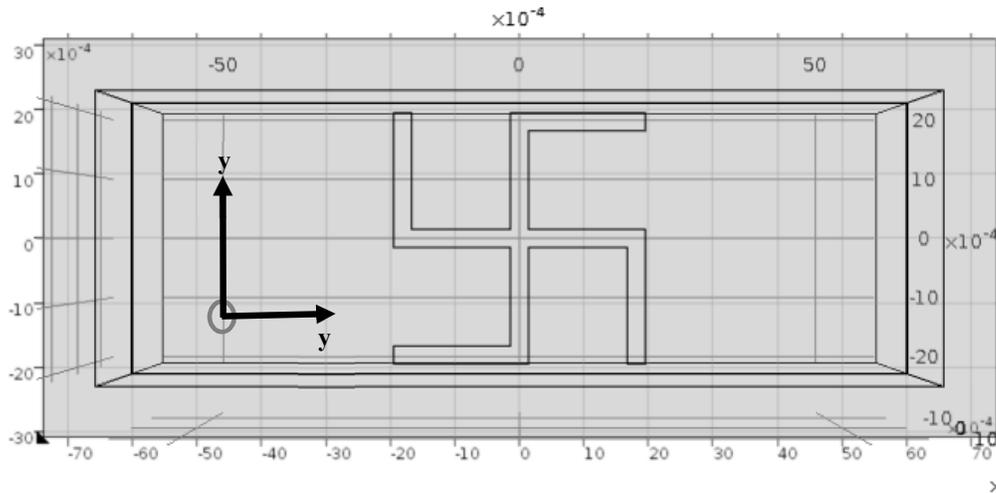


Figura 4.3 vista dall'alto sul piano  $xy$  della cella; si nota la forma a svastica delle inclusioni metalliche

La figura in alto mostra la prospettiva sul piano  $yz$ , mentre in basso quella sul piano  $xy$ . Come si vede le dimensioni complessive della cella primitiva sono identiche sia a quelle dell'assorbitore di Landy che a quelle del wide angle absorber. Nel caso della cella con l'assorbitore a forma di svastica lo slab dielettrico misura 0.51 mm, mentre i due air box posti in posizione simmetrica rispetto allo slab misurano 15,3265 mm ciascuno ( $(31,163 \text{ mm} - 0.51 \text{ mm})/2 = 15,3265$ ).

### 4.3 Comportamento in polarizzazione TE

Procedendo come nei casi precedenti è stato dapprima implementato uno sweep in frequenza tra 8 e 16 GHz con passo di 0.01 GHz. Le onde piane sono state eccitate nella porta 1 con il vettore d'onda  $k$  propagantesi lungo l'asse positivo delle  $z$ . Sulle superfici laterali del dispositivo metamateriale (piani  $zx$ ,  $zy$ ) sono state applicate come condizioni di contorno quelle periodiche, mentre quelle di transizione sono state applicate alle inclusioni metalliche, sempre in rame. Procedendo in analogia con quanto fatto precedente, il campo elettrico è stato imposto lungo l'asse delle  $x$   $E_x = \exp(-i \cdot k_a y)$  con l'apice  $a$  che denota il fatto che l'ingresso e poi l'uscita dal dispositivo del campo avvengono in aria; sulle superfici della cella primitiva lungo il piano  $xz$  et  $yz$  sono state assegnate le condizioni di Floquet. L'asse delle  $x$  stavolta è stato scelto come parallelo al lato maggiore della cella primitiva rettangolare. Effettuando lo studio in incidenza normale ( $\alpha=0$ )

e facendo variare la frequenza tra 8 e 16 GHz si nota come la risposta del risonatore sia una risonanza di assorbimento in corrispondenza di 11.30 GHz, quindi all'interno della banda X:

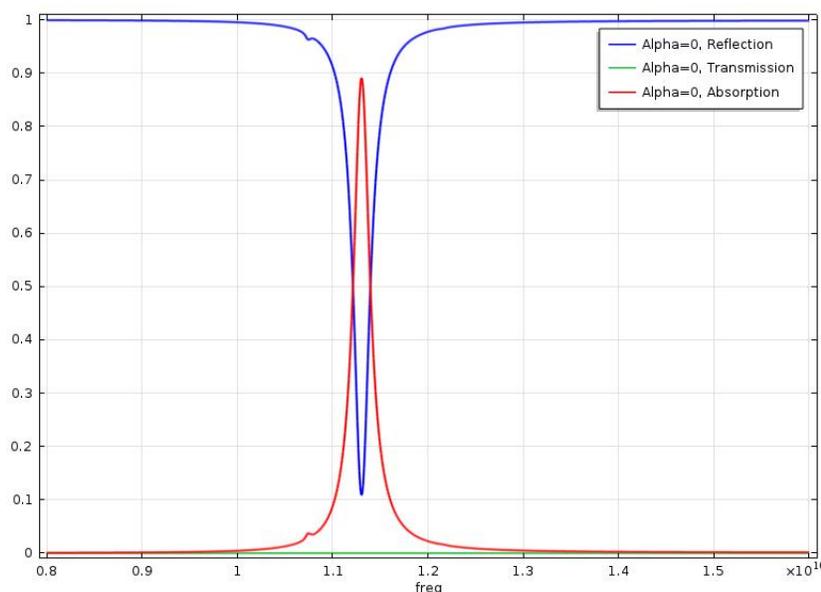


Figura 4.4: Risultato dello sweep in frequenza. Si nota una risonanza di assorbimento ad 11.30 GHz, in polarizzazione TE. L'assorbimento è in rosso, la trasmittanza in verde e la riflettanza in azzurro.

Dal grafico si evince un assorbimento attestato sull'89,1% in corrispondenza della frequenza di 11.30 GHz. Si tratta quindi di un assorbimento si elevato ma non efficiente come si verificava per il wide angle absorber con epsilon immaginaria pari a 0.06. C'è però un notevole recupero rispetto alla forma del wide angle absorber con epsilon dello slab dielettrico pari a 0.001575, dove il dispositivo esibisce un assorbimento pari al 73% circa. Effettuando lo sweep angolare in corrispondenza della frequenza di 11.30 GHz si nota anche qui una buona prestazione ma con delle differenze rispetto ai precedenti casi:

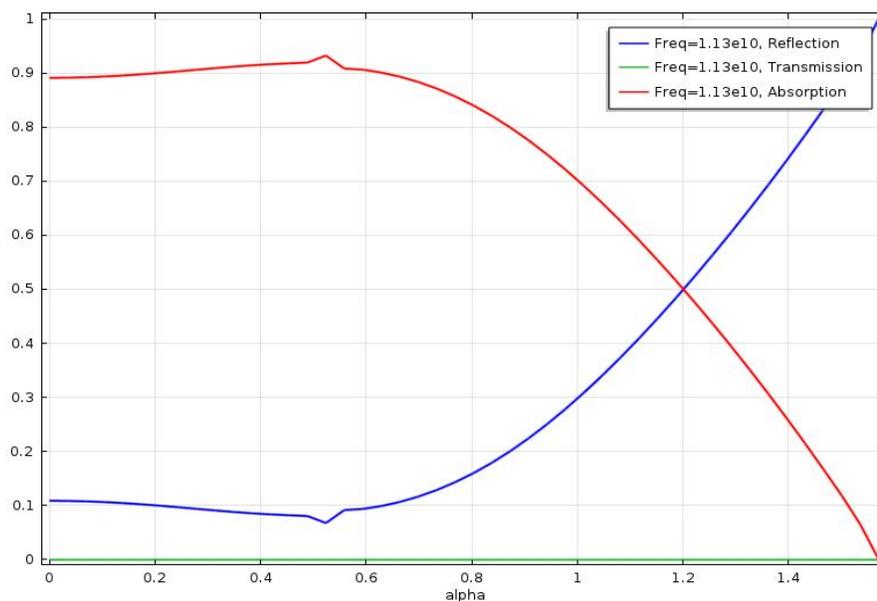


Figura 4.5 Risultati dello sweep angolare in polarizzazione TE. È presente un deciso assorbimento fino a grandi angoli. In rosso è riportato l'assorbimento. La trasmissione è in verde, la riflettanza in azzurro

Come per la configurazione del wide angle absorber si evidenzia un allargamento dell'assorbimento angolare sia pure di minore entità ed efficienza. L'assorbimento si mantiene attorno al 90% con una leggera crescita fino a circa 30 gradi laddove si raggiunge un picco di assorbimento di 0,923. Il declino è anche un po più rapido; in corrispondenza di un radiante (circa 57,29 gradi) l'assorbimento è al 70%, mentre a circa 68,75 gradi tale valore si riduce a 0.50 anche da questo punto di vista l'assorbimento si presenta più efficiente con il mantenimento del risonatore quadrato ruotato di 90 gradi sia con epsilon dielettrica di 0.01575 che di 0.06.

In conclusione in polarizzazione TE il risonatore a svastica a cella primitiva rettangolare mostra un recupero della percentuale d'assorbimento fino a circa 57 gradi rispetto al wide angle absorber con epsilon immaginaria pari a 0.01575, ma una perdita di efficienza rispetto al wide angle absorber con epsilon immaginaria pari a 0.06. Il declino dell'assorbimento al crescere dell'angolo è invece più rapido rispetto ad ambo le configurazioni dielettriche.

#### 4.4 Comportamento in polarizzazione TM

Dopo l'analisi in in polarizzazione TE, studiamo il caso TM. La configurazione è la medesima di prima ma sostituiamo il campo elettrico lungo l'asse x con quello magnetico  $H_x = \exp(-i \cdot k_a y)$ . Prima di mostrare i risultati degli sweep angolari ed in frequenza è possibile prevedere che a differenza delle altre configurazioni, in cui nella banda in frequenza considerata non si evincono particolari comportamenti, sarà possibile avere ora delle risonanze anche con onde piane elettromagnetiche con polarizzazione TM per via della maggior simmetria della struttura a svastica in quanto la radiazione incidente interagisce con strutture simili. In condizioni di incidenza normale con campo magnetico H orientato lungo l'asse x si riscontra il seguente comportamento tra 8 e 16 GHz:

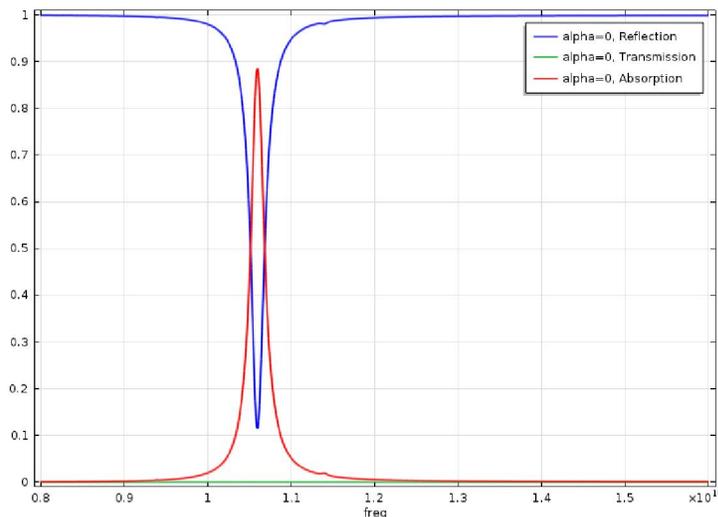


Figura 4.6 Sweep in frequenza in polarizzazione TM. La simmetria a svastica esibisce una risonanza anche per questa polarizzazione a 10.60 GHz

A differenza delle strutture precedentemente analizzate (assorbitore di Landy e wide angle absorber) si nota chiaramente una risonanza in polarizzazione TM a 10.60 GHz. In concomitanza di tale valore si riscontra un assorbimento pari ad 88.5% del segnale elettromagnetico (linea a tratto rosso). È quindi evidente come la maggiore simmetria della geometria a svastica comporti la comparsa di una risonanza di assorbimento anche nel modo TM, peculiarità questa che invece non

si riscontra negli assorbitori con la presenza di risonatori a simmetria quadrata, precedentemente analizzati. La trasmittanza resta trascurabile grazie alla presenza del piatto metallico (curva verde).

Lo svantaggio è invece, che sebbene elevato, tale assorbimento è inferiore al 90% e risulta marcato solo per una ristretta frequenza di lavoro. Aumenta quindi globalmente l'assorbimento nelle due polarizzazioni TE e TM, ma ci si allontana dalla idealità di assorbitore quasi perfetto.

Dopo aver svolto lo studio in frequenza, effettuiamo ora quello angolare, effettuato tenendo fissa la frequenza a 10.60 GHz. Il piano di incidenza è quello yz, con il campo magnetico H che permane orientato lungo l'asse delle x. Lo sweep è stato svolto tra 0 e 90 gradi con step di 2 gradi. Il grafico di seguito riportato è in radianti ed evidenzia in rosso l'assorbanza, in verde la trasmittanza ed in azzurro la riflettanza:

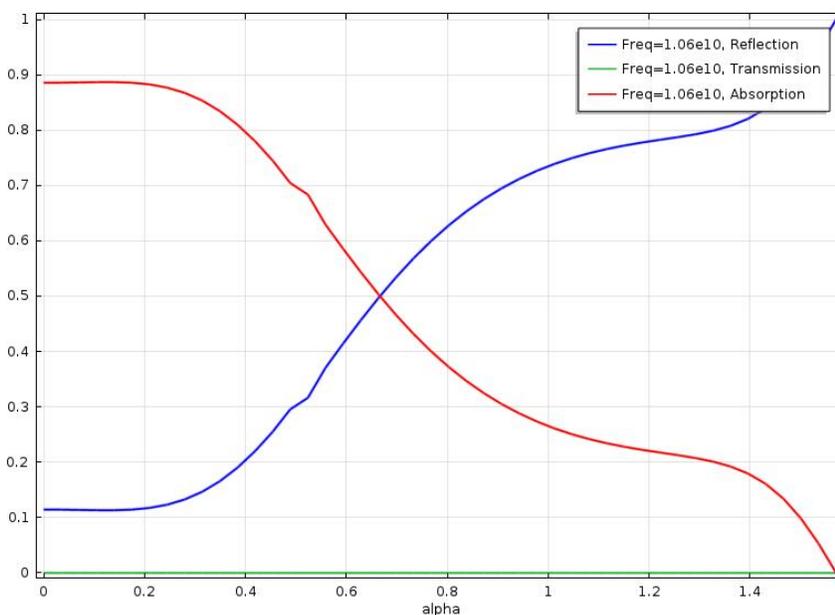


Figura 4.8 Sweep angolare in polarizzazione TM a 10.60 GHz. L'assorbimento (curva a tratto rosso) si mantiene elevato per angoli di incidenza piccoli

Il responso dello sweep è eloquente e mostra un assorbimento angolare che non si limita alla sola incidenza normale; tuttavia rispetto al caso TE l'intervallo angolare in cui esso risulta buono è decisamente più ristretto. L'assorbimento si mantiene su valori di circa l'88% fino a 0.2 radianti (11,5°) per poi declinare progressivamente; a 0.4 radianti (circa 23 gradi) la percentuale di radiazione assorbita si abbassa all'80%, mentre attorno 0.67 radianti (poco più di 38°) la frazione assorbita si attesta già a 0.5, contestualmente ad un rialzo della riflettività.

Le simulazioni numeriche mostrano quindi come l'utilizzo di inclusioni metalliche con la forma di svastica in luogo del risonatore quadrato conducano alla comparsa di risonanze di assorbimento anche nel modo TM; l'assorbimento angolare è elevato fino ad angoli grandi per il modo TE e fino a piccoli angoli per il TM, tuttavia la percentuale di radiazione assorbita è sì elevata, ma minore che utilizzando il risonatore quadrato (ma con la epsilon dielettrica più dissipativa).

La svastica rivela quindi un aumento della capacità di assorbimento utilizzando i materiali con le caratteristiche dielettriche disponibili, estendendo la risonanza al modo TM senza però raggiungere l'efficienza in termini di livello di assorbimento del risonatore quadrato. Analizziamo ora un ulteriore caso di assorbitore a svastica con cella primitiva quadrata.

#### **4.5 Struttura dello swastiska absorber-caso cella primitiva a base quadrata**

Viene qui discusso ora il caso del wide absorber a svastica ma con la geometria della base della cella primitiva di forma quadrata. La diversità di prestazioni nelle varie forme finora prese in considerazione e con i modi TE e TM sono riconducibili alla differente geometria che i campi costituenti l'onda "vedono" quando si propagano all'interno del dispositivo. Ciò causa differenti risposte utilizzando le polarizzazioni TE e TM.

Maggiore sarà la simmetria delle inclusioni metalliche e maggiore risulterà l'efficacia delle risonanze di assorbimento a prescindere dal modo TE o TM con cui l'onda incidente interagisce sull'assorbitore. A tal proposito facendo variare i parametri geometrici come ci si attendeva la simmetria quadrata della cella va a produrre risultati decisamente più ottimali in termini di assorbimento in modo indipendente dal tipo di polarizzazione della radiazione in arrivo.

La simmetria quadrata è semplicemente una piccola modifica ai lati delle celle primitive che ora assumono pari valore e precisamente il valore di 8.4 mm. A livello pratico il piatto metallico rettangolare diviene quadrato, mentre per quel che concerne il piano top del metamateriale nulla cambia: spessore e larghezza delle inclusioni metalliche restano i medesimi così come la forma a svastica, lo spessore del dielettrico e la sua costante dielettrica.

Lo studio del valore da assegnare al lato è stato svolto effettuando degli sweep sul lato della cella. Si è visto che la simmetria quadrata dava ottime prestazioni su ambo le polarizzazioni e per grandi angoli ed inoltre il valore di 8,4 mm è risultato essere quello più efficiente in termini di assorbimento. La figura sottostante mostra il variare dell'assorbanza in condizioni di incidenza normale ( $\alpha=0$ ) facendo variare il valore del lato. Al fine di non appesantire la simulazione numerica lo studio è stato fatto variando fissando al valore di 8.4 mm il valore di un lato e facendo variare il valore dell'altra dimensione tra 7.6 mm e 10 mm con un intervallo di 0.8 mm. Si è visto che il valore per cui la cella assume forma quadrata con tutti i lati pari ad 8.4 mm presenta i migliori risultati:

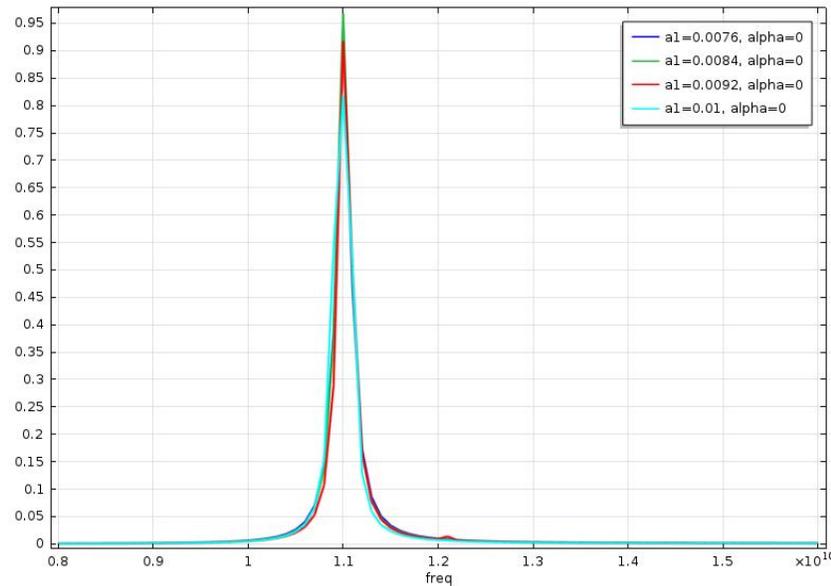


Figura 4.9. Studio dell'ottimizzazione delle dimensioni del lato della cella per massimizzare l'assorbanza del dispositivo

Nella legenda della figura le misure sono riportate in m. La frequenza considerata è tra 8 e 16 GHz. È interessante notare che al variare della dimensione di una delle due dimensioni la frequenza di risonanza resta ancorata al valore di 11 GHz: ciò che muta sono però le prestazioni in termini di percentuale di radiazione assorbita: allargando in dettaglio si perviene ai seguenti risultati (figura sottostante):

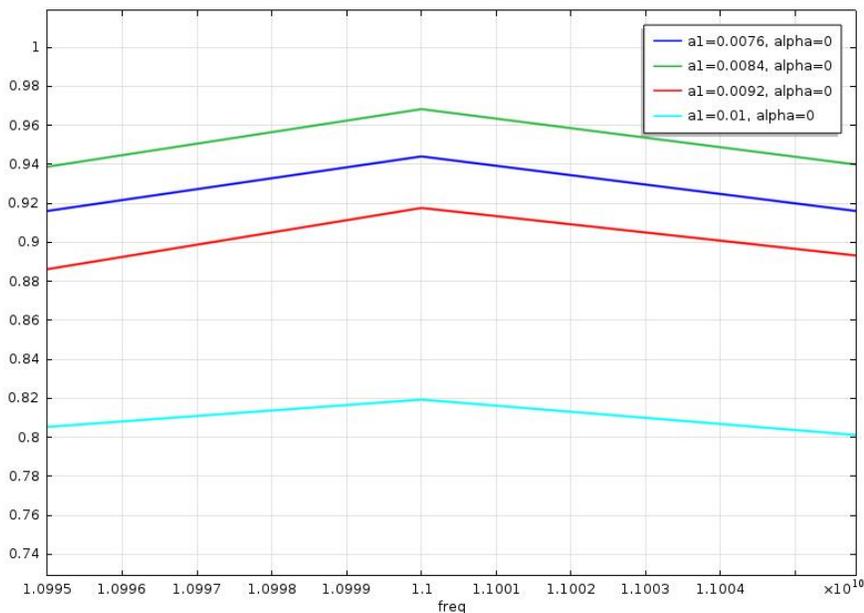


Figura 4.10. Dettaglio dell'analisi; la migliore prestazione si ha con lato della cella pari ad 8.4 mm.

I differenti colori mostrano il picco d'assorbimento in corrispondenza degli 11 GHz al variare del valore del lato. I valori considerati sono 7.6 mm, 8.4 mm, 9.2 mm e 10.0 mm. La frequenza di lavoro quindi non si sposta; muta invece l'efficienza di assorbimento. Quando uno dei lati assume valore 7.6 mm si ha un assorbimento prossimo al 94.5%; per un valore di 9.2 mm si osserva invece un'assorbanza attestata su un valore di poco inferiore al 92%. Se il lato assume valore 10 mm si ha la minima efficienza nell'intervallo considerato (circa l'82%), viceversa quando i due lati assumono l'identico valore di 8.4 mm si riscontrano i migliori risultati con assorbanza di circa il 97%. Quest'ultimo è stato perciò scelto come valore da assegnare alla cella primitiva quadrata.

Le due figure di seguito illustrano la forma del lato top e down della cella primitiva del risonatore dopo questo ulteriore cambiamento:

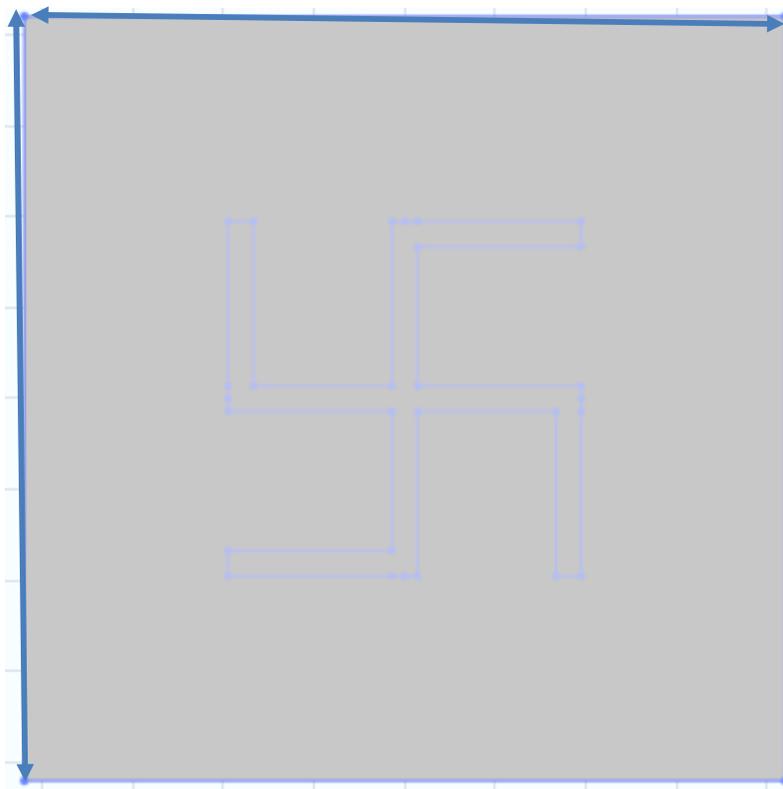
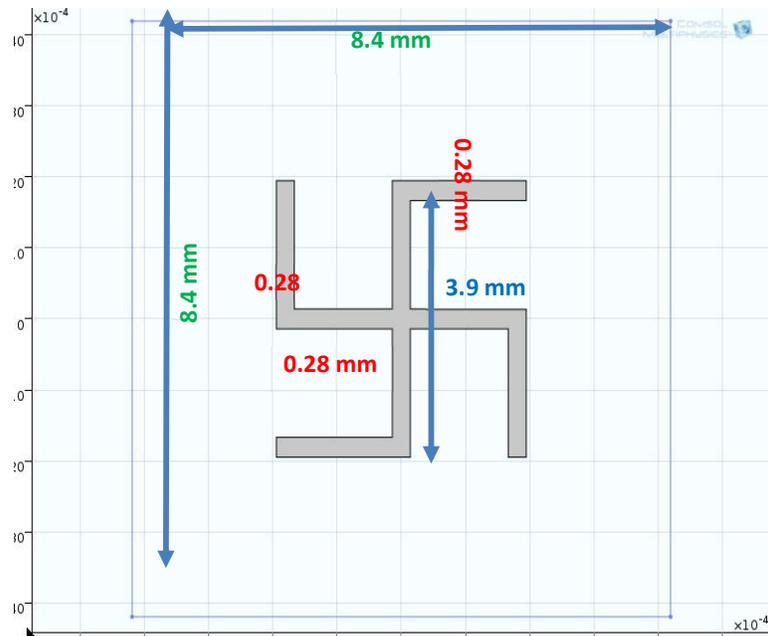


Figura 4.11 dettaglio delle superfici top e bottom del dispositivo a svastica a cella quadrata; sono riportate le dimensioni delle inclusioni metalliche

Si nota come la larghezza delle inclusioni metalliche sia 0.28 mm, mentre le dimensioni della cella primitiva sono ora di 8.4 mm x 8.4 mm come si evince dalla copertura metallica in rame rappresentata dal bottom della cella primitiva dell'assorbitore.

Come per le precedenti configurazioni si studiano gli effetti della polarizzazione TE e TM nelle direzioni y.

#### 4.6 . Caso polarizzazione TE.

Su comsol Multiphysics viene impostato lo sweep prima in frequenza tra 8 e 16 GHz con step di 0.01 GHz in condizioni di incidenza normale con campo elettrico orientato lungo l'asse delle x, preso parallelamente ad uno dei lati della cella quadrata. Sono imposte condizioni di periodicità di Floquet sulle facciate yz e xz della cella primitiva. Il vettore d'onda è orientato lungo l'asse delle z positive, verso secondo cui si propaga l'onda elettromagnetica. L'output di Comsol è il seguente:

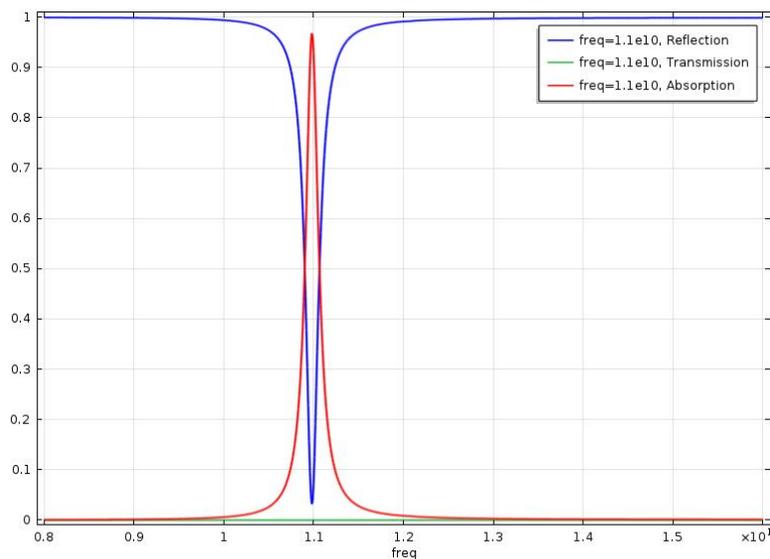


Figura 4.12. Risultato dello sweep in frequenza in polarizzazione TE. È evidente una forte risonanza d'assorbimento (tratto rosso) ad 11 GHz, in banda X

il grafico illustra una risonanza molto piccata in corrispondenza della frequenza di lavoro pari a 11 GHz, ove si riscontra il massimo dell'assorbimento, valutabile in circa il 97% della radiazione

elettromagnetica. La risonanza come si vede è molto piccata e stretta; discostandosi anche di poco da essa l'efficienza di assorbimento decade immediatamente in modo incisivo.

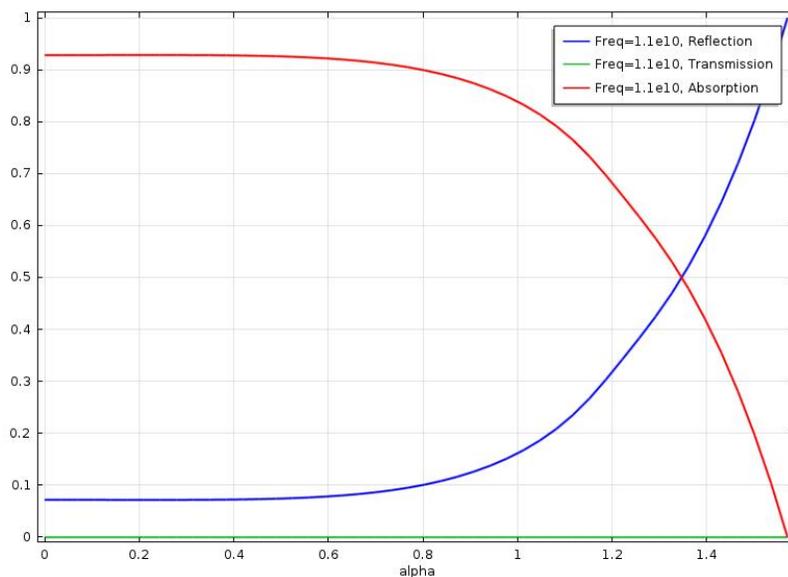


Figura 4.13. Lo sweep angolare conferma un forte assorbimento fino a grandi angoli, in polarizzazione TE.

Il grafico sovrastante illustra i risultati dello sweep angolare tra 0 e 90 gradi ma con scala riportata in radianti sulle ascisse. La frequenza è selezionata pari a quella di incidenza ossia di 11 GHz. Mantenendo la convenzione dei colori come per i precedenti grafici, la linea a tratto blu rappresenta la riflessione, il verde la trasmittanza, mentre l'assorbimento è la linea rossa. Si nota come l'assorbimento si mantenga elevato anche per grandi angoli, raggiungendo prestazioni paragonabili a quelle dell'assorbitore con risonatore quadrato: a 45° di incidenza la percentuale di radiazione elettromagnetica assorbita si attesta sul 90% per poi ridursi al 50% ad 80 gradi. Già da questo risultato numerico possiamo dire che le performance del risonatore a svastica con cella quadrata sono decisamente migliori di quello a geometria rettangolare. L'estensione angolare dell'assorbimento è simile a quello del wide absorber, tuttavia, sebbene elevata, la percentuale di radiazione assorbita è di qualche per cento più bassa, rendendo la struttura un buon assorbitore ma allontanandola dalla condizione di assorbitore perfetto (assorbimento quasi unitario). Tale risultato

mostra ancora una volta come quanto maggiore sia la simmetria della cella primitiva tanto più aumenta la qualità dei risultati a prescindere dal tipo di polarizzazione imposta.

#### 4.7 Caso polarizzazione TM

Dopo lo studio effettuato in polarizzazione TE consideriamo quella TM imponendo il campo intensità magnetica  $H$  orientato lungo l'asse positivo delle  $x$  con piano di incidenza  $yz$  ed effettuando dapprima lo sweep in frequenza in condizioni di incidenza normale e successivamente svolgendo l'analisi angolare tra  $0$  e  $90$  gradi, selezionando la frequenza pari a quella in cui si verifica la risonanza di assorbimento.

Lo sweep in frequenza fornisce come risposta una risonanza in corrispondenza di  $11$  GHz con percentuale di radiazione elettromagnetica assorbita pari al  $97\%$ . Una cosa che è possibile notare, frutto proprio della scelta di imporre una geometria quadrata, risiede nel valore della risonanza d'assorbimento; ora sia per il modo di polarizzazione TM che TE si attesta sugli  $11$  GHz, in quanto la radiazione incidente "vede" le medesime strutture metalliche con ambo i modi.

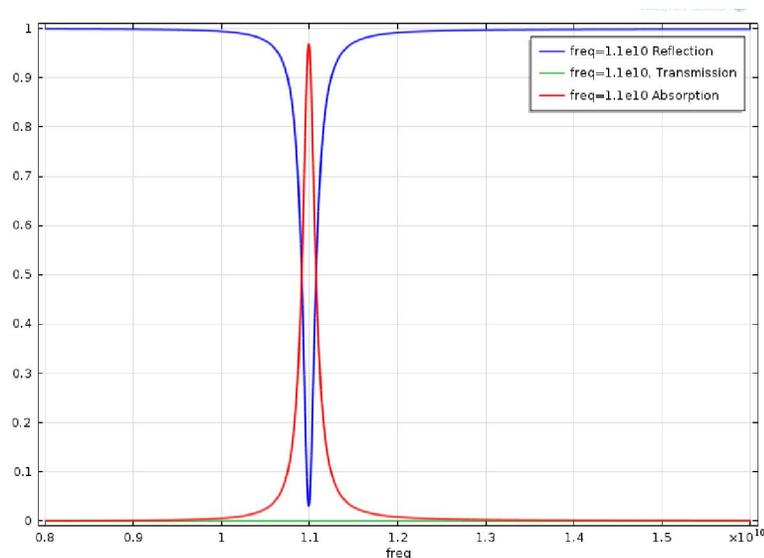


Figura 4.13. sweep in frequenza in polarizzazione TM; si nota una risonanza d'assorbimento ad  $11$  GHz

L'assorbimento (tratto rosso) raggiunge un picco prossimo del 97% in corrispondenza della frequenza di lavoro, ma tende poi a diminuire notevolmente allontanandosi da essa in modo rapido. Il piatto metallico mantiene nulla la trasmissione (linea a tratto verde). Rispetto al caso con cella primitiva rettangolare si evidenzia un netto aumento percentuale dell'assorbanza che avvicina il dispositivo alla condizione di PMA (Perfect Metamaterial Absorber) e la frequenza di lavoro diventa identica per ambo le polarizzazioni.

Il successivo sweep angolare svolto lungo il piano yz tra 0 e 90 gradi in corrispondenza della frequenza di 11 GHz fornisce il seguente risultato:

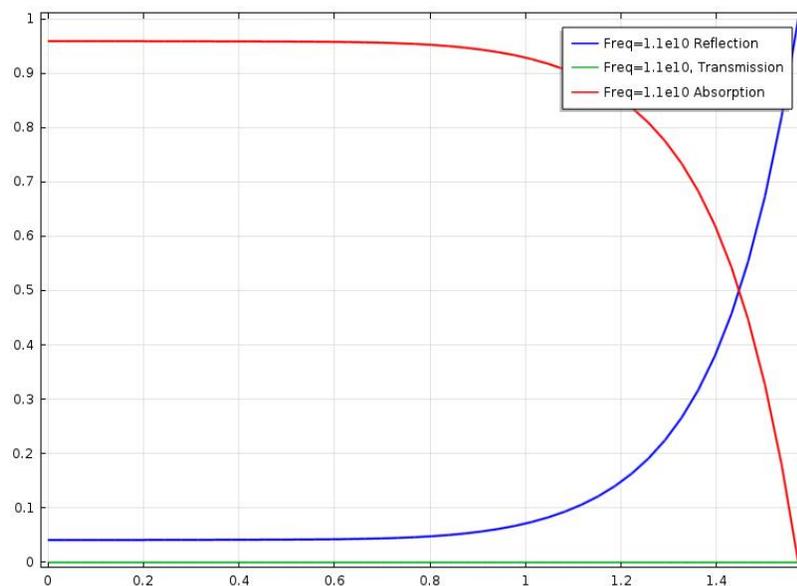


Figura 4.14 Trend delle curve di Assorbimento, Riflessione e Trasmissione ad 11 GHz in polarizzazione TM nel risonatore a svastica con cella quadrata

È evidente un assorbimento di circa il 97% fino a 35 gradi. Successivamente si osserva un graduale calo dell'assorbanza che si riduce all'85% a 68.75 gradi e al 70% a 77 gradi circa. Le varie simulazioni portano a concludere che la forma a svastica del risonatore porta complessivamente ad un netto incremento dell'efficienza di assorbimento. La sostituzione del risonatore quadrato con

la svastica modifica nettamente il comportamento dell'assorbitore che ora esibisce un comportamento no sensitive polarization oltre che un largo assorbimento angolare.

Ricapitalando i vari step numerici ed effettuando i dovuti confronti si conclude che:

- L'assorbitore di Landy mostra un forte assorbimento per un valore puntuale in frequenza, ma un ristretto assorbimento angolare; tale risonanza si osserva solo per la polarizzazione in configurazione trasverso elettrica. Il dielettrico utilizzato per riprodurre il dispositivo di Landy possiede un valore della epsilon dielettrica pari a  $3-i*0.06$
- La rotazione di 90 gradi del risonatore, l'assottigliamento della larghezza delle inclusioni metalliche e la sostituzione della strip metallica con un piatto metallico sul lato bottom della cella primitiva conducono ad una marcata frequenza di risonanza nel modo TE con allargamento angolare dell'assorbimento, si tratta quindi di un **wide angle absorber**. I limiti di tale struttura risiedono nel fatto che il dispositivo lavora bene per una singola frequenza e solo in polarizzazione TE, ma non in TM. La costante dielettrica utilizzata è pari a  $4.50-i*0.06$ .
- A questo punto per ragioni di disponibilità commerciale dei materiali è sorta l'esigenza di rieseguire il calcolo numerico con costante dielettrica uniformata agli standard Arlon e pari a  $4.50-i*0.01575$ . Tale modifica pur lasciando inalterato il trend dell'assorbimento angolare ha condotto ad un ridimensionamento percentuale della frazione di radiazione assorbita
- Una possibile soluzione che consenta di recuperare le performances dell'assorbitore a fronte del cambiamento degli attributi dielettrici è l'utilizzo della **simmetria a svastica** in luogo del risonatore quadrato.
- La **simmetria a svastica** porta ad un sostanziale recupero delle proprietà dell'assorbitore wide angle ed anzi comporta la comparsa di una risonanza di assorbimento anche nel modo

trasverso magnetico. L'unica limitazione è la perdita di qualche per cento di assorbimento (che comunque resta elevato) rispetto al **wide angle absorber** con epsilon immaginaria pari a 0.06. La struttura a svastica è stata provata sia con la geometria della cella primitiva rettangolare che quadrata. Ambo le configurazioni mostrano un netto recupero della percentuale di energia elettromagnetica assorbita, tuttavia la configurazione con una cella primitiva quadrata evidenzia non solo un buon assorbimento di oltre il 95% per grandi angoli ma anche un buon funzionamento del dispositivo nelle due polarizzazioni. L'assorbitore diventa quindi un **wide angle absorber no sensitive polarization**. Tale progresso risiede nelle proprietà geometriche della configurazione a svastica con cella quadrata: la radiazione incidente vede una struttura geometricamente equivalente, influenzando i valori di induttanze e capacità cui a sua volta sono legati i valori delle frequenze di risonanza. A riprova di ciò la configurazione con massima simmetria causa una risposta di assorbimento angolare nei due modi di simile entità ed anche in corrispondenza dello stesso valore della frequenza di risonanza.

Concludendo lo svastica absorber risulta più performante degli assorbitori basati su risonatore quadrato (analizzati in questa tesi), in quanto si ha un assorbimento percentuale notevole per gradi angoli e per ambo le polarizzazioni anche a fronte dell'utilizzo di dielettrici caratterizzati da basse perdite come attestano i risultati di cui sopra.

## CAPITOLO 5: IL DISPOSITIVO PMA ELABORATO CON IL GRUPPO DI RICERCA PER LE MISURE

### 5.1 Struttura realizzata in collaborazione con il gruppo di Ricerca

In questo capitolo verrà introdotto un ulteriore assorbitore che funziona bene come PMA in polarizzazione TE. Tale struttura è stata elaborata in collaborazione con tutto il gruppo di ricerca ed è qui schematizzata:

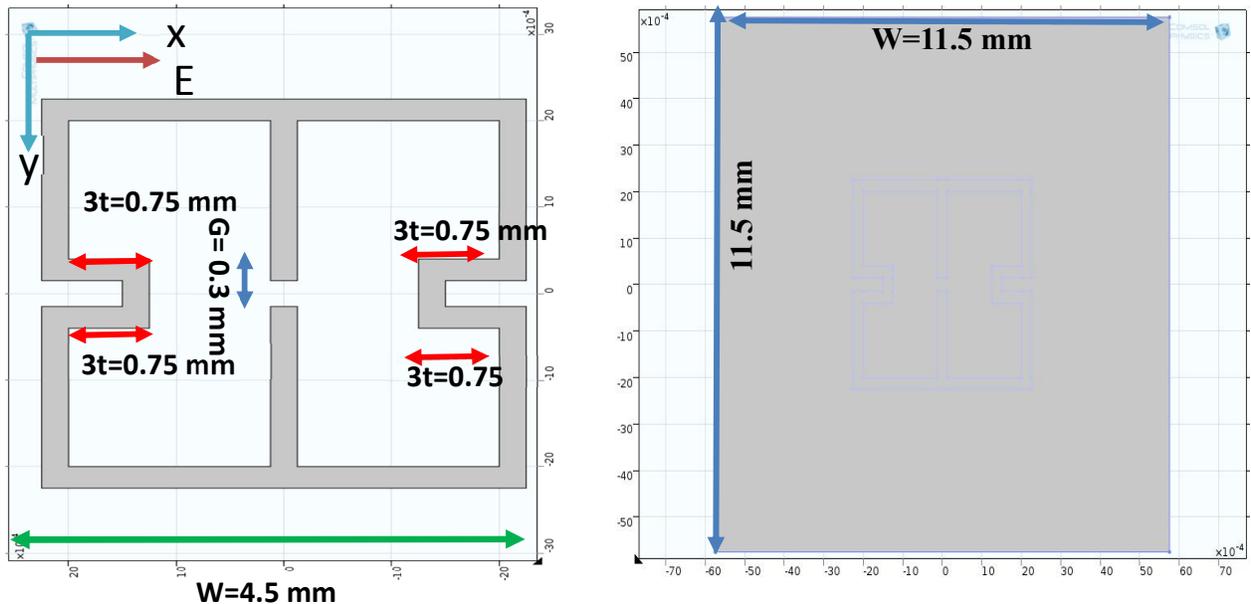


Figura 5.1: struttura del PMA elaborato con il gruppo di ricerca da sottoporre a misure come DUT. Sulla superficie inferiore è stato mantenuto il piatto metallico ma con cella di simmetria quadrata.

Il risonatore è ora dotato di conduttore centrale con split; sui lati sono state introdotte delle rientranze che creano delle capacità aggiuntive. Il lato misura ora  $4.5\text{ mm}$ , mentre i lati della cella primitiva ora anch'essa di geometria quadrata misurano  $11.5\text{ mm} \times 11.5\text{ mm}$ . Il piano inferiore è ricoperto da un piatto metallico come per le configurazioni precedenti. La larghezza delle inclusioni metalliche è ora  $0.25\text{ mm}$ . Scegliendo gli assi di riferimento di modo che l'asse x sia ortogonale al conduttore con split centrale si è effettuato, con la procedura collaudata nei casi

precedenti dapprima uno studio in frequenza tra 6 e 13 GHz e successivamente uno sweep angolare tra 0 e 90 gradi in concomitanza della frequenza di lavoro individuata.

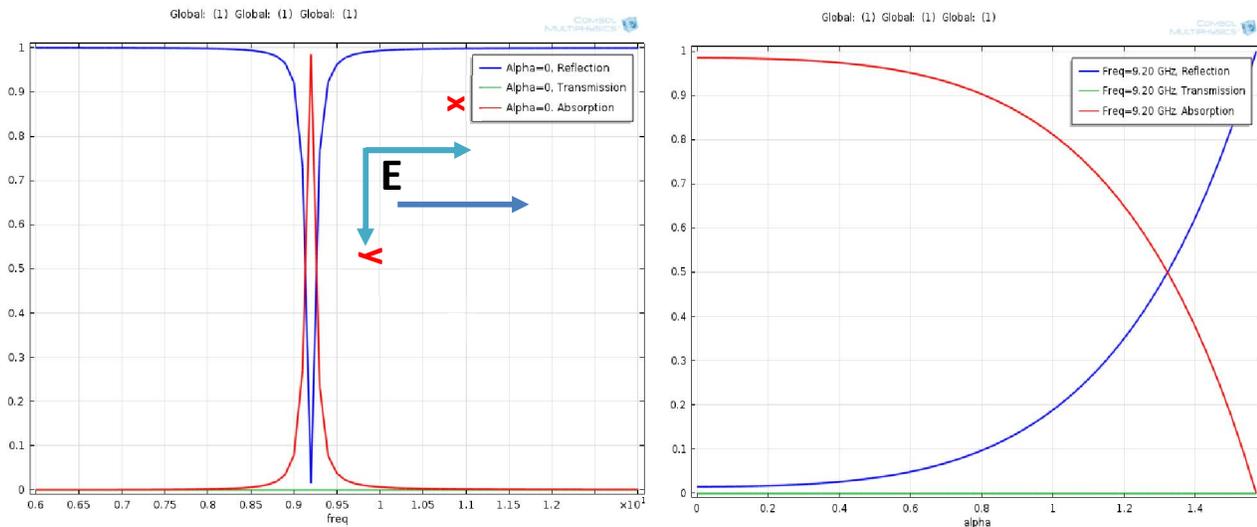


Figura 5.2. risultato della simulazione in polarizzazione TE; in incidenza normale è presente una risonanza a 9.20 GHz. Il successivo sweep angolare conferma un buon assorbimento angolare (80% a 0.8 radianti)

L'immagine soprastante riporta i risultati dello sweep numerico con il campo elettrico orientato lungo l'asse delle x sia in condizioni di incidenza normale che in incidenza obliqua (polarizzazione lineare TE rispetto al piano di incidenza yz). Si evince una frequenza di risonanza a 9.20 GHz in piena banda X. Il successivo studio angolare mostra un buon assorbimento angolare con il 90 % della radiazione incidente assorbita fino a 0.8 radianti. L'assorbanza diventa del 50% a circa 1.3 radianti, mostrando in tal modo come anche tale assorbitore si comporti come un wide absorber.

A questo punto in analogia con la precedente casistica è stato svolto il medesimo studio per la polarizzazione TM ottenuta imponendo in luogo del campo elettrico l'intensità magnetica lungo l'asse delle X.

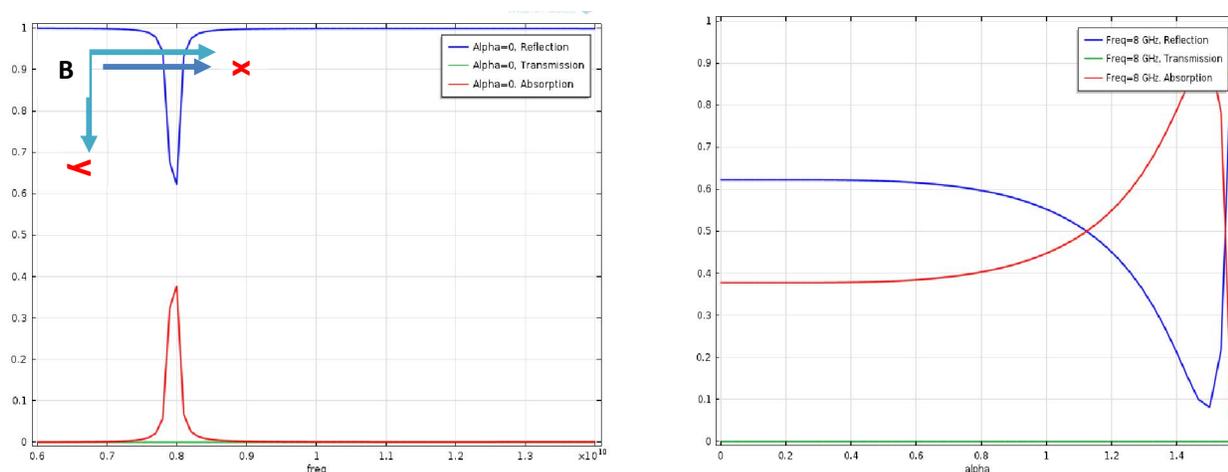


Figura 5.3 Polarizzazione TM. Frequenza di risonanza ad 8 GHz in incidenza normale. In polarizzazione TM lo sweep angolare mostra come la percentuale di radiazione assorbita si mantenga sul 40%. Si nota un picco ad 1.5 radianti circa dovuto all'angolo di Brewster.

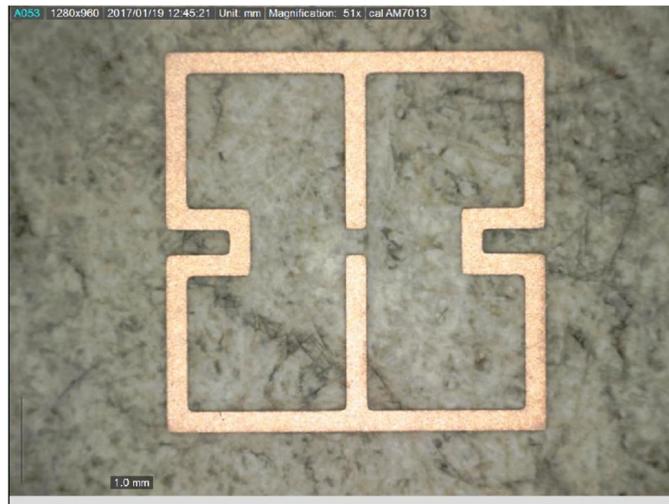
Come si vede anche la polarizzazione TM mostra una risonanza, sebbene più debole in corrispondenza degli 8 GHz. Lo sweep angolare eseguito tra 0 e 90 gradi in condizioni di polarizzazione TM evidenzia un assorbimento inferiore del 40% che inizia a crescere dopo i 0.6 radianti avvicinandosi all'angolo di Brewster. In definitiva la nuova struttura elaborata in collaborazione con tutto il gruppo di ricerca funziona come PMA in polarizzazione TE rispetto al piano di incidenza yz fino a circa un radiante. Il passo successivo è stata la realizzazione pratica del dispositivo per avere poi una struttura realizzata da sottoporre a test di misura.

## 5.2 Realizzazione della struttura realizzata in collaborazione con il gruppo di Ricerca

Il passo successivo allo studio numerico è stata la realizzazione fisica del dispositivo realizzata in collaborazione con una società che si occupa dei circuiti stampati. Senza dilungarsi nei particolari tecnici i step della fabbricazione del dispositivo metamateriale sono gli stessi della preparazione dei circuiti:

- I) Impaginazione tramite CAD-CAM.
- II) Preparazione del pannello di Rame
- III) Stesura della superficie foto sensibile sul pannello
- IV) Riproduzione con unità laser dell'immagine
- V) Incisione chimica
- VI) Finitura meccanica

La procedura industriale è identica a quella della preparazione dei circuiti stampati. In tal modo si è ottenuto un pannello delle dimensioni 43,8 cm x 59,8 cm con spessore di 0,508 mm con un lato ove sono stati incisi i risonatori quadrati e l'altro corrispondente al bottom ricoperto in rame (piatto metallico).



*Figura 5.4 dettaglio della cella primitiva del pannello ove è stato inciso il risonatore in rame.*

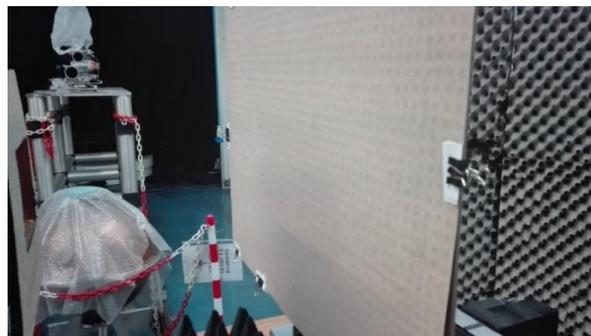
La figura sovrastante mostra una singola cella elementare ingrandita dell'assorbitore simulato tramite Comsol. A questo punto lo step successivo sono state le misure svolte presso l'IFP-CNR di Milano.

### 5.3 Set up di misura

Le misure sono state svolte presso il CNR-IFP di Milano in configurazione monostatica ad incidenza normale ponendo il pannello ad una distanza di 300 mm da un'antenna rettangolare dalle dimensioni 125 mm x 100 mm. La riflettività è stata stimata per confronto tra la superficie completamente metallizzata e quella parzialmente metallizzata del campione stesso. Le misure sono state eseguite sia in copolarizzazione che in crosspolarizzazione. Oltre alle misure sul campione si sono svolte misurazioni di riflettività su dell'Eccosorb AN73 che su un corto fisso di dimensioni simili a quelle del campione progettato. Lo strumento utilizzato è un mVNA, un analizzatore di rete vettoriale per onde millimetriche. Di seguito sono mostrate alcune immagini dell'apparato sperimentale allestito per lo svolgimento delle misure:



*Figura 5.5 set up di misura: antenna emittente in banda X piu pannello DUT. Si notano anche le schermature*



*Figura 5.6 particolare del pannello come DUT, in configurazione monostatica in incidenza normale*

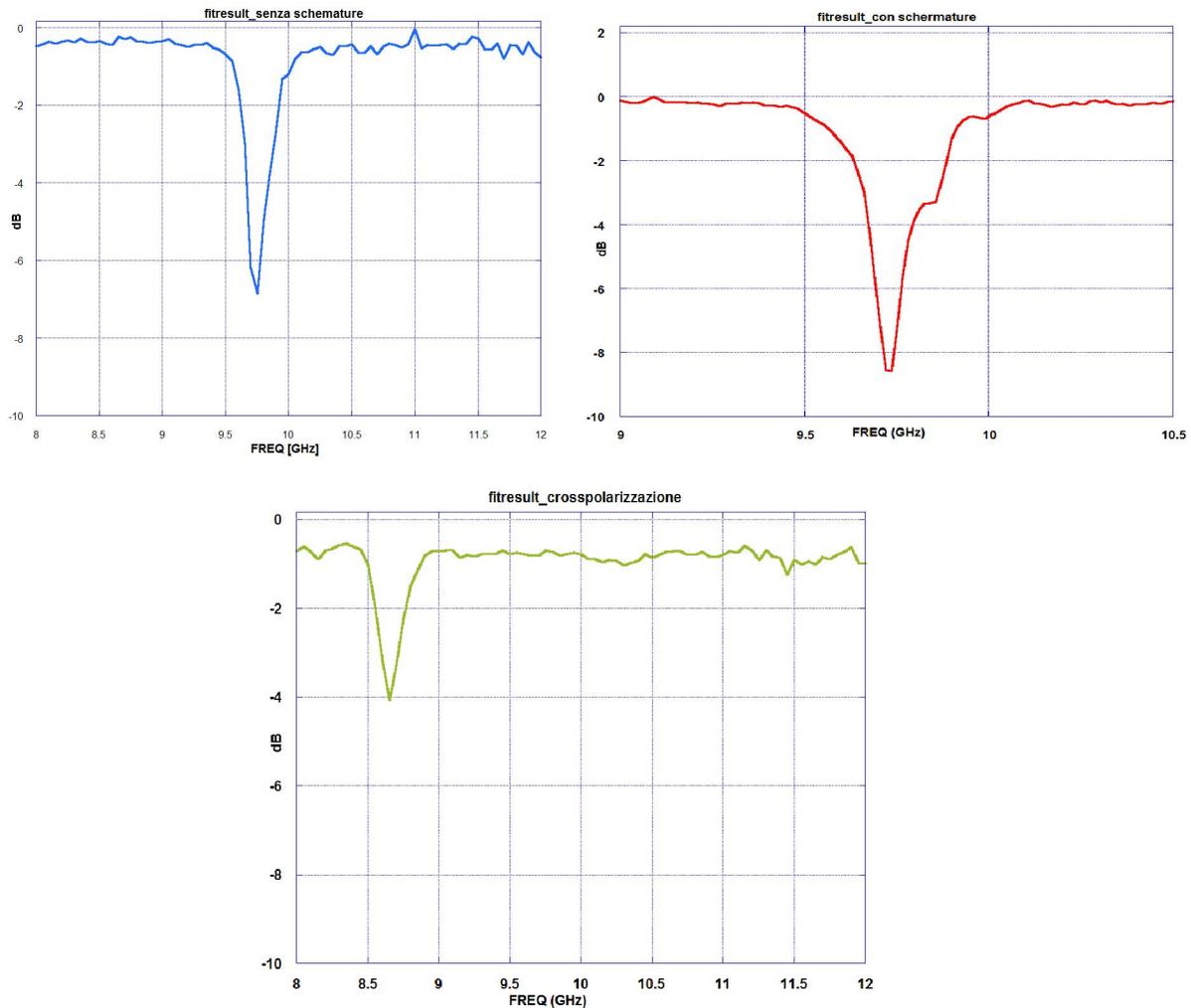


*Figura 5.7 set up di misura, antenna emittente in Banda X.*

come è possibile notare dalle immagini attorno al DUT sono state disposte delle schermature in modo da eliminare eventuali effetti ascrivibili a riflessioni spurie. Attualmente le misure hanno riguardato l'incidenza normale eseguite in configurazione monostatica.

#### **5.4 Misure in banda X sul campione**

Le misure sul campione, eseguite in condizioni di incidenza normale, sono state svolte posizionando il campione ad una distanza di 300 mm dall'antenna rettangolare emittente in banda X. Per ricavare la riflettività del campione si è effettuato un confronto tra la misura della riflessione generata dalla superficie completamente metallizzata e quella parzialmente ricoperta dalle deposizioni metalliche in rame. Le misure sono state svolte sia in copolarizzazione che in crosspolarizzazione. Infine è stato effettuato un confronto anche con un assorbitore AN73 e con un piano metallico di dimensioni simili a quelli del pannello sottoposto a misure per attestare la bontà delle misure svolte:



*Figura 5.8 Misure in copolarizzazione e crosspolarizzazione del campione PMA in incidenza normale. Il primo riquadro in alto a sinistra illustra un primo sweep in frequenza realizzato in assenza di schermature. Il secondo riquadro in alto a destra mostra la risonanza trovata a 9.73 GHz, con sweep ristretto tra 9 e 10.5 GHz. In questo caso le misure sono state prese con le schermature per ridurre gli effetti di eventuali riflessioni indesiderate. L'ultimo riquadro in basso mostra la risonanza individuata in crosspolarizzazione a circa 8.65 GHz.*

Il riquadro soprastante riporta la riflettività del campione sotto test. Il primo grafico in alto a sinistra riporta un primo sweep in frequenza tra 8 e 12 GHz ed è stato effettuato senza schermature protettive. Il secondo grafico mostra la riflettività dello stesso campione con l'applicazione delle schermature ed eseguendo al contempo uno sweep più ristretto e dettagliato in frequenza tra 9 e 10.5 GHz. Queste prime misure sono state svolte in copolarizzazione ed il risultato è in dB.

Si nota come la frequenza di risonanza sia presente a circa 9.73 GHz e come nel caso della misura in copolarizzazione con schermature la riflettanza di poco inferiore a  $-8$  dB corrisponda a circa 0.15 contro lo 0.015 delle simulazioni numeriche. L'ultimo riquadro riporta la riflessione in crosspolarizzazione che come nelle attese fornisce una più debole risonanza d' assorbimento. Le misure danno una riflettanza di  $-4$  dB corrispondente ad una riflettanza di circa 0.4 contro i 0.63 circa della simulazione numerica. Per quel che concerne le frequenze di risonanza le misure danno rispettivamente 8.65 GHz per la crosspolarizzazione ed un valore di di 9.73 GHz per la copolarizzazione contro gli 8 GHz e 9.20 GHz delle simulazioni numeriche.

Per escludere errori attribuibili all'apparato sperimentale sono state fatte ulteriori misure su un assorbitore AN73 e su un piano metallico dalle dimensioni simili a quelle del pannello DUT.

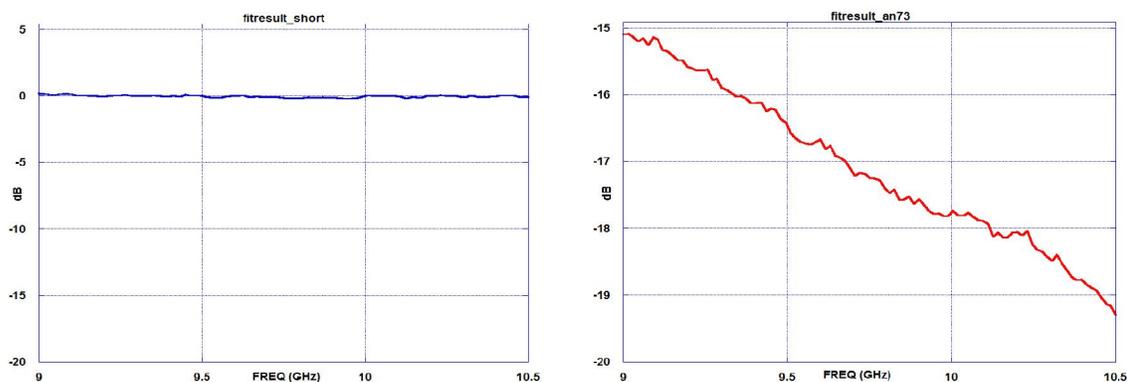


Figura 5.9 riflettività uno short di prova e di un assorbitore AN73

I trend sopra riportati sono coerenti con le attese aspettate per lo short e l'assorbitore. È possibile quindi concludere che per quel che concerne la copolarizzazione il pannello esibisce un comportamento da PMA vista l'elevata percentuale di radiazione assorbita. Attualmente le misure sono tuttora in corso e per verificare le discrepanze tra valori delle frequenze di risonanza ottenuti dalle simulazioni e osservati occorreranno ulteriori approfondimenti. È possibile però ipotizzare che tali differenze siano riconducibili alle dimensioni delle inclusioni metalliche sulla facciata incisa del pannello o allo spessore stesso del pannello, fattori questi che andrebbero a condizionare il valore della risonanza.

## 5.5 Confronto misure e simulazioni numeriche

Come precedentemente discusso nel corso delle misure si sono riscontrate delle differenze tra quanto aspettato in base alle simulazioni numeriche svolte tramite Comsol e quanto osservato poi con le misure fatte sul dispositivo. Il quadro generale è riassunto dalle seguenti tabelle valide per le due polarizzazioni:

<b>TABELLA DI CONFRONTO COPOLARIZZAZIONE</b>	<b>FREQUENZA DI RISONANZA</b>	<b>RIFLETTIVITA' INCIDENZA NORMALE</b>
<b>SIMULAZIONI</b>	<b>9.20 GHz</b>	<b>0.015</b>
<b>MISURE</b>	<b>9.73 GHz</b>	<b>0.15</b>

<b>TABELLA DI CONFRONTO CROSSPOLARIZZAZIONE</b>	<b>FREQUENZA DI RISONANZA (GHz)</b>	<b>RIFLETTIVITA' INCIDENZA NORMALE</b>
<b>SIMULAZIONI</b>	<b>8 GHz</b>	<b>0.63</b>
<b>MISURE</b>	<b>8.65 GHz</b>	<b>0.40</b>

Si è ipotizzato che tali discrepanze tra misure e simulazioni fosse riconducibile ad imperfezioni riguardanti le inclusioni metalliche. Si è quindi svolto uno studio sulle dimensioni della cella primitiva. Fotografando il risonatore (figura sottostante) e tramite il conteggio dei pixel si sono stimate le dimensioni delle inclusioni metalliche. Tale operazione è stata svolta su una singola cella:

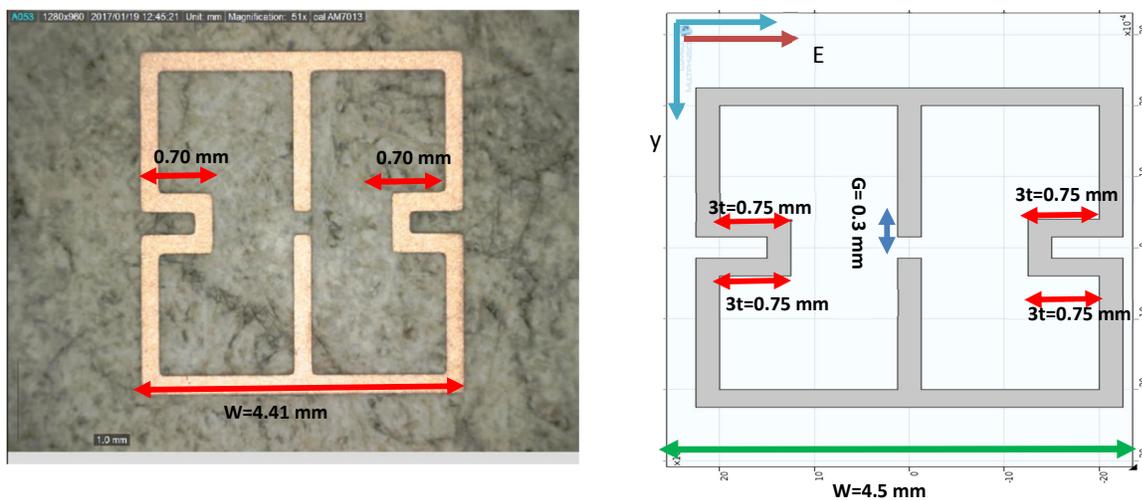


Figura 5.10 confronto tra le dimensioni del modello teorico del dispositivo progettato e tra quelle stimate tramite il conteggio dei pixel.

Dalla figura si nota come il lato del risonatore risulti essere di circa 4,41 mm in luogo di 4,5 mm mentre le rientranze metalliche poste sui due lati risultino essere di circa 0.70 mm invece di 0.75 mm. Il passo successivo e finale è stata l'implementazione di una nuova simulazione numerica con l'inserimento delle nuove dimensioni stimate. I risultati sono stati i seguenti:

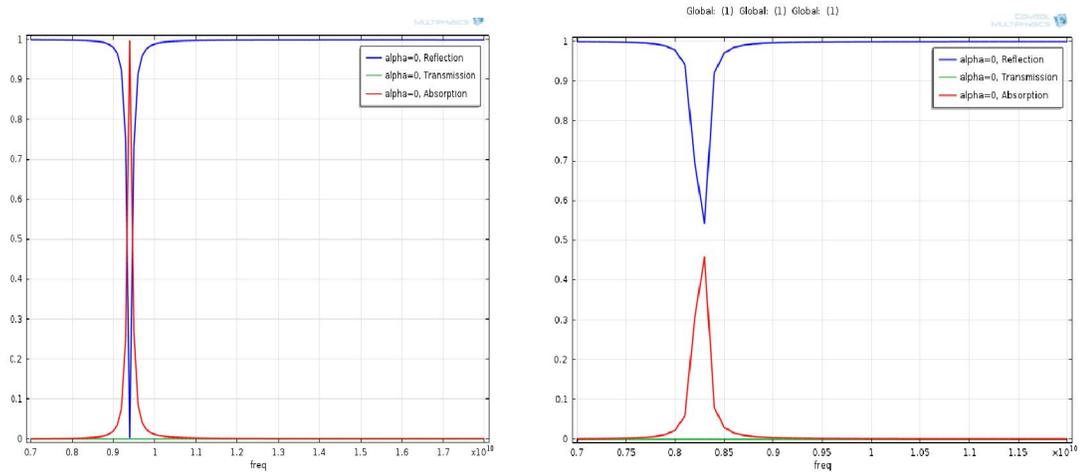


Figura 5.11 Risultati delle simulazioni numeriche in incidenza normale inserendo le dimensioni stimate con il conteggio dei pixel. Si evidenzia uno spostamento delle frequenze di risonanza verso l'alto di 0.20 GHz, la differenza quindi tra misure e risultati numerici si attenua ma non si elimina del tutto.

Le simulazioni sono state svolte impostando il campo elettrico e successivamente quello magnetico lungo l'asse delle x (campi ortogonali al conduttore centrale dotato di split). Le simulazioni con le nuove dimensioni stimate tramite il conteggio dei pixel hanno evidenziato uno spostamento della frequenza verso l'alto di 0.20 GHz e ciò implica un avvicinamento alle frequenze di risonanza trovate tramite le misure. I nuovi risultati sono riportati nelle seguenti tabelle:

TABELLA DI CONFRONTO COPOLARIZZAZIONE	DI	FREQUENZA DI RISONANZA (GHz)	DI	RIFLETTIVITA' IN INCIDENZA NORMALE
SIMULAZIONI		9.40		0.005
MISURE		9.73		0.15

<b>TABELLA DI CONFRONTO CROSSPOLARIZZAZIONE</b>	<b>FREQUENZA DI RISONANZA (GHz)</b>	<b>RIFLETTIVITA' IN INCIDENZA NORMALE</b>
<b>SIMULAZIONI</b>	<b>8.20 GHz</b>	<b>0.623</b>
<b>MISURE</b>	<b>8.65 GHz</b>	<b>0.40</b>

L'entità della percentuale di radiazione riflessa resta quasi invariata rispetto alle simulazioni impostate con i parametri originari. In conclusione le nuove simulazioni hanno evidenziato un avvicinamento delle frequenze di risonanza trovate con le misure con quelle numeriche, senza però che le differenze siano colmate. Le discordanze che restano sia in frequenza che in termini di entità della percentuale della radiazione riflessa sono probabilmente riconducibili alle proprietà dello slab dielettrico posto tra le inclusioni metalliche e forse ad altre irregolarità delle inclusioni metalliche che richiederanno ulteriori analisi per una completa comprensione. Nelle prossime settimane le misure ad incidenza obliqua potrebbero fornire nuove indicazioni riguardo ciò.

## 6. MISURE RIFLETTIVITA' DI ASSORBITORI PER MICROONDE ED ONDE MILLIMETRICHE PRESSO IFP-CNR DI MILANO

### 6.1 Tratti generali

Questo capitolo della tesi viene dedicato all'attività di Ricerca che sto svolgendo presso il CNR, Istituto di Fisica del Plasma di Milano (CNR-IFP) a partire da Gennaio 2016. Sebbene indipendente l'argomento è affine a quello della tesi di Dottorato infatti il tema della tesi sono gli assorbitori metamateriali, obiettivo dell'attività lavorativa è la misurazione della riflettività su assorbitori (a struttura piramidale), prototipi destinati al calibratore di un radiometro per un satellite meteorologico (METOP-SG, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/metop-sg>). Quindi l'attività che sto svolgendo durante questo assegno di Ricerca, prevalentemente di misure sul campo può essere considerata a buon ragione un completamento pratico del percorso di studio.

### 6.2 Descrizione generale dell'attività

Scopo delle varie campagne di misura è la stima della riflettività di campioni di prova e prototipi destinati al calibratore di un radiometro a bordo di un satellite meteorologico della prossima generazione (METOP-SG).

A causa della ridotta dimensione dei campioni di prova, si è deciso di lavorare con fasci gaussiani, ossia con fasci di onde elettromagnetiche la cui irradianza si distribuisce gaussianamente attorno ad un centro secondo la classica distribuzione a campana. Le misure sono state effettuate con un VNA (Abmillimetre MVNA 8-350-4).

Dopo l'allineamento dei fasci su banco apposito, è stato allestito il banco per le misure di riflettività. Le misure sono state fatte su uno specchio, usato come riferimento per la riflettività totale, sui campioni da misurare, forniti dalla società appaltatrice, e su altri due assorbitori commerciali ben noti (Eccosorb AN73 e CV4), utilizzati come controllo. Le misure sono state svolte studiando il comportamento del parametro di scattering  $S_{11}$  all'interno della banda in

frequenza di volta in volta presa in esame (sweep in frequenza). I test di misurazione sono stati effettuati in condizioni di incidenza normale con configurazione monostatica facendo ricorso a diverse tecniche di calibrazione.

### 6.3 Le bande di frequenza coinvolte

Prima di entrare più nello specifico vengono qui dettagliate e tabulate le bande in frequenza coinvolte nelle varie sessioni di misura svoltesi in laboratorio. Sono richieste misure nell'intervallo di frequenza tra 12 GHz e 220 GHz. Le bande che cadono in tale parte dello spettro elettromagnetico sono designate in ordine crescente come Ku, K, Ka, Q, V, W, D e G. Di seguito sono riportati in tabella la sigla della banda, la corrispondente guida d'onda rettangolare standard e il relativo intervallo di frequenza interessato.

<b>Nome banda</b>	<b>Guida d'onda</b>	<b>Intervallo di frequenze ( GHz)</b>
<b>Ku</b>	<b>WR62</b>	<b>12 -18</b>
<b>K</b>	<b>WR42</b>	<b>18-27</b>
<b>Ka</b>	<b>WR28</b>	<b>26.5-40</b>
<b>Q</b>	<b>WR22</b>	<b>33-50</b>
<b>V</b>	<b>WR15</b>	<b>50-75</b>
<b>W</b>	<b>WR10</b>	<b>75-110</b>
<b>D</b>	<b>WR6</b>	<b>110-170</b>
<b>G</b>	<b>WR5</b>	<b>140-220</b>

### 6.4 Le misure sui campioni: generalità

Le misure sono state svolte ricorrendo a diverse tecniche di calibrazione del VNA, ma si è deciso di utilizzare la calibrazione in spazio libero (free space) perchè più rapida. La riflettività dei due campioni è stata ottenuta per confronto con uno specchio di identiche dimensioni. Non era specificata la posizione del *piano di riferimento*, quindi sono state fatte misure con i campioni in

diverse posizioni rispetto allo specchio. Si e' poi scelto di posizionare il piano di riferimento sulle punte delle piramidi.

## 6.5 Sistema di misura

Le misure sono state effettuate in configurazione monostatica usando il VNA dell'IFP. Lo schema e' mostrato in figura 6.1. Il sistema ottico è tale che il waist ricada in prossimità alla posizione dello specchio, anche se i fasci si sono rivelati leggermente astigmatici. La lente 1 ha una lunghezza focale di 150 mm, la lente 2 di 225 mm. La superficie dello specchio è alla distanza focale nominale di 225 mm dal piano della seconda lente. La distanza tra antenna e prima lente è stata calcolata per ogni banda di modo da rendere il waist d'ingresso il più vicino possibile al piano focale della lente 1. Le misure hanno confermato i parametri delle varie bande, in conformità a quanto stimato con i calcoli e possono ritenersi buone data la loro natura non critica.

## 6.6 Tecnica di calibrazione

**Calibrazione in aria (free space).** La calibrazione free space è stata la più utilizzata durante le misurazioni perché fornisce risultati affidabili in tempi relativamente rapidi. Con tale tecnica di misura la riflettività dei campioni sotto test viene ottenuta per confronto con quella di uno specchio di identiche dimensioni. Specchio e bersagli sono stati posizionati su uno stadio mobile pilotato dal VNA. Sia lo specchio che i campioni sono stati soggetti ad un'escursione spaziale di circa  $\pm \lambda/4$  lungo la direzione di propagazione del fascio, dove  $\lambda$  è la massima lunghezza d'onda nella banda di frequenza in uso.

Poiché viene variata solamente la posizione del dispositivo sotto test (specchio o campione), con buona approssimazione si modifica solo la fase della radiazione riflessa dal bersaglio, pertanto il parametro S11 descrive un cerchio nello spazio delle fasi, il cui centro è il contributo dovuto all'errore sistematico, mentre la riflettività è stimata dal rapporto tra i raggi dei cerchi ottenuti da specchio e campioni<sup>39,40,41,42</sup>.

I raggi dei cerchi nello spazio delle fasi sono stati determinati mediante analisi statistica e fit. I due modi di procedere conducono a risposte diverse in presenza di errori sistematici ascrivibili alle

riflessioni spurie da parti mobili e ciò permette di valutare la bontà delle misure. Da ambo le elaborazioni è possibile ottenere la deviazione standard (a patto ovviamente che il numero delle misure sia sufficientemente alto) ed utilizzarla per stimare le barre d'errore. I campioni soddisfano le specifiche entro tre deviazioni standard, ossia un livello di confidenza del 99%.

L'analisi è stata svolta con passi in frequenza di 0.5 GHz alle frequenze più basse e 1 GHz da 110 a 220GHz. Il processo di calibrazione rimuove intrinsecamente le riflessioni ambientali (stazionarie), mentre quelle riconducibili a componenti mobili del sistema sono state rimosse o comunque attenuate con schermature realizzate con Eccosorb AN73 posizionato sulle parti metalliche mobili dell'apparato sperimentale.

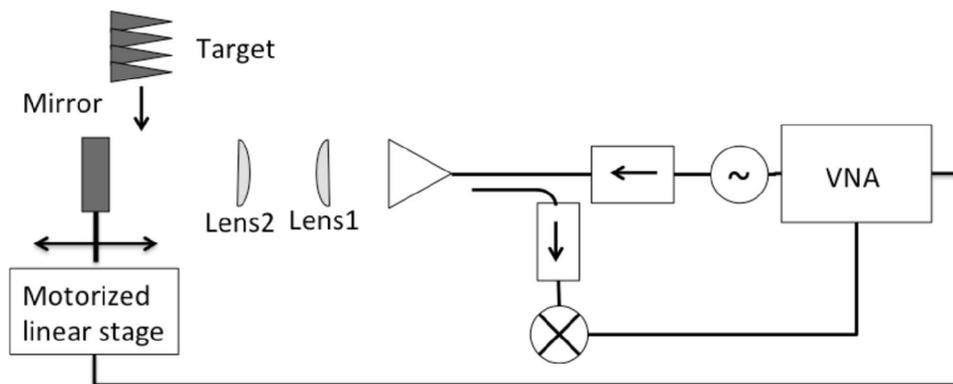


Figura 6.1. Schema del set up sperimentale con calibrazione in aria. Si noti come lo specchio e poi l'assorbitore vengano spostati dallo stadio motorizzato durante le operazioni di misura.

## CONCLUSIONI

Obbiettivo di questa dissertazione di Dottorato è stato lo studio degli assorbitori metamateriali con lo scopo di acquisire tutte le informazioni utili a comprendere lo stato attuale dell'arte di questo promettente campo di ricerca così poi da poter progettare una struttura performante di questo tipo ex-novo.

Il percorso di ricerca ha preso le mosse dallo studio e dalla riproduzione tramite software di simulazione numerica Comsol Multiphysics di una struttura la cui funzionalità era già nota a priori: l'assorbitore di Landy, un dispositivo consistente di uno slab dielettrico e dotato di inclusioni metalliche in rame (un risonatore quadrato ed una strip metallica). Tale struttura riprodotta su piattaforma Comsol Multiphysics ha fornito sia un modello di partenza su cui poi lavorare sia un test di validità per confrontare la bontà della riproducibilità dei risultati già noti in letteratura con il software elettromagnetico.

Il lavoro principale si è concentrato sul miglioramento delle prestazioni dell'assorbitore di Landy. Sono state fatte modifiche che hanno interessato il numero di strati, le dimensioni del risonatore quadrato, lo spessore dello strato dielettrico. Dopo molti test si è ottenuta una nuova struttura assorbente, un wide angular absorber che esibisce rispetto al dispositivo di partenza un maggiore assorbimento angolare in polarizzazione TE, ma mantiene stretto l'assorbimento in frequenza. Il risultato può comunque considerarsi buono alla luce del fatto che il wide angular absorber esibisce una semplice geometria.

La fase di realizzazione del dispositivo si è rivelata difficoltosa per tutta una serie di difficoltà legate alla reperibilità dei materiali dalle caratteristiche dielettriche ricercate ed ha condotto all'esigenza di ridisegnare (in equipe con il gruppo di ricerca) il dispositivo da sottoporre ai test di misura.

L'ultima parte del Dottorato è stata dedicata alla ricerca di una geometria che migliorasse ulteriormente la funzionalità dell'assorbitore. A tal proposito il ricorso ad una geometria delle inclusioni metalliche con forma di svastica in sostituzione del risonatore quadrato (swastika absorber) ha permesso di rendere il wide angular absorber non polarizzazione sensitive con buone prestazioni quindi sia in presenza di onde TE che TM.

Ardua si è invece rivelata la ricerca di un modello circuitale che consentisse di controllare direttamente i parametri geometrici in relazione alle capacità ed induttanze equivalenti; a tale scopo le misure sul campo previste per i prossimi mesi sulla struttura ridisegnata potrebbero fornire nuovi elementi di spunto anche in tale direzione.

In conclusione il lavoro svolto nel triennio di Dottorato e qui presentato ha mostrato come anche a fronte di piccoli cambiamenti nella geometria o nella disposizione spaziale delle inclusioni metalliche all'interno di un assorbitore metamateriale si possano ottenere miglioramenti in termini

di assorbimento anche sensibili. La ricerca di un modello circuitale che consenta di mettere in relazione i parametri geometrici della struttura con la risonanza ricercata richiederà invece ulteriori studi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Sov. Phys. Usp.* 10, 509-514 (1968).
- [2] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber", *Phys. Rev. Lett.* 100, 207402,1-4, (2008).
- [3] C. M. Watts, X. Liu, and W.J. Padilla "Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers," *Advanced Optical Materials*, 2012, 24, OP98-OP120.
- [4] F. Todisco, M.Todisco "Invisibilità e rifrazione negativa in mezzi nanochirali" Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento, CNR Nanotech.
- [5] N.Tedeschi "Metamaterial Electromagnetic Absorbers", - Diet, Università La Sapienza (02/07/2015)
- [6] Lab - Introduction to Finite Element Methods and COMSOL Multiphysics Lab, Scientific Computing III, Uppsala, Universitet
- [7] Y. Vahabzadeh, K. Achouri and C. Caloz "Simulation of Metasurfaces in Finite Difference Techniques", *arXiv:1602.04086v1 [physics.optics]* 12 Feb 2016
- [8] G. Singh "Short Introduction to Finite Element Method", Norwegian University of Science and Technology
- [9] Yosuke Mizuyama, Ph.D. "Introduction to COMSOL Multiphysics", Introductory tutorial in Kanda July 9, 2015
- [10] R. J. Le Veque "Finite Difference Methods for Differential Equations", University of Washington Version of September, 2005
- [11] R.L. Haupt "Optimizing Salisbury Screens Using FEKO" 22nd Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics March 12-16, 2006
- [12] C.K. Yuzcelik absorbing material design" Thesis and dissertation Monterey, California. Naval Postgraduate School, "Radar 2003
- [13] Y. Zhou "A STUDY OF ELECTROMAGNETIC ABSORBERS AND CLOAKS FOR THE REDUCTION OF ELECTROMAGNETIC SCATTERING", Dissertation, Department Electrical Engineering The Pennsylvania State University, August 2015
- [14] L.K. Sun, H.F. Cheng, Y.J. Zhou and J. Wang "Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface" *Optics Express* Vol. 20, No. 4 4675-4680.

- [15] C. Argyropoulos “Electromagnetic Absorbers Based on Metamaterial and Plasmonic Devices” Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT) Center for Metamaterials and Integrated Plasmonics, Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Durham, NC 27708, USA.
- [16] M. K. Hedayati, F. Faupel and M. Elbahri “Review of Plasmonic Nanocomposite Metamaterial Absorber” *Materials* 2014, 7, 1221-1248
- [17] B. J. Arritt, D. R. Smith, and T. Khraishi, “Equivalent circuit analysis of metamaterial strain-dependent effective medium parameters,” *Journal of Appl. Phys.* 109, 073512, 1-5, (2011).
- [18] X. Zhao “Bottom-up fabrication methods of optical metamaterials” *Journal of Materials Chemistry* 22, 9439-9449 (2012).
- [19] F. Hu, L. Wang, B. Quan, X. Xu, Z. Li, Z. Wu and X. Pan “Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber” *Journal of Physics D: Applied Physics.* 46, 195103, 1-8 (2013).
- [20] L.L.-Yang, W. Jun, D. H.-Liang, W.-J.-Fu, Q. S.-Bo “Achieving a “multi-band metamaterial perfect absorber via a hexagonal ring dielectric resonator” *Chinese Physics B*, 24(6), 064201, 1-7 (2015)
- [21] J. A. Kong , *Electromagnetic Wave Theory* , 2 nd Ed. , John Wiley & Sons, Inc ., New York 1990 .
- [22] H. A. Kramers , *Atti Cong. Intern. Fisica (Transactions of Volta Centenary Congress)* , Como 1927 , 2 , 545
- [23] *Fundamentals of Optical Science* Spring 2006 - Class 4
- [24] A. Kazemzadeh “Thin Wideband Absorber with Optimal Thickness” *Electromagnetic Theory* Department of Electrical and Information Technology Lund University Sweden
- [25] K. N. Rozanov “Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers” *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 48, NO. 8, AUGUST 2000
- [26] “Fresnel Equations”, *Wave Optics Module Model Library* (1-18)
- [27] *RF Module, Users Guide – Comsol*
- [28] G. Dolling, “Design, fabrication and characterization of double-negative metamaterials for photonics”, 2007.
- [29] N. Tedeschi, F. Frezza e A. H. Sihvola, “On the perfectly matched layer and the DB boundary condition”, *J. Opt. Soc. Am. A*, 30, n. 10, pp. 1941-1946, 2013.
- [30] B. J. Arritt, D. R. Smith, and T. Khraishi, “Equivalent circuit analysis of metamaterial strain-dependent effective medium parameters”, *Journal of Appl. Phys.* 109, 073512, 1-5 (2011).

- [31] B. Wu., B. Li, T. Su e C.-H. Liang, “Study on Trasmission Characteristic of Split-ring Resonator Defected Ground Structure”, *Piers Online Vol. 2, n. 6*, pp. 710-714, 2006.]
- [32] M.R. Vidyalakshmi and Dr.S.Raghavan “Comparison of Optimizazion Techniques for Square Split Ring Resonator” *INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY*, VOL.5 NO.5 SEPTEMBER 2010
- [33] F. Bilotti, A. Toscano, L. Vegni, K.Aydin, K.B Alici, E.Ozbay “Equivalent-Circuit Models for the Design of Metamaterials Based on Artificial Magnetic Inclusions” *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 55, NO. 12, DECEMBER 2007 2865-2873
- [34] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martín, R. M. Sillero, F. Falcone,T. Lopetegi, M.A.G. Laso, J. G.–García, I. Gil, M. F. Portillo, and M. Sorolla, “Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines” *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 53, NO. 4, APRIL 2005
- [35] R. Marqués, F. Mesa, J. Martel, F. Medina, “Comparative Analysis of Edge- and Broadside-Coupled Split Ring Resonators for Metamaterial Design—Theory and Experiments” *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 51, NO. 10, OCTOBER 2003
- [36] O.G. Vendik, S.P. Zubko, and M.A. Nikol’skii, “Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film,” *Technical Physics*, Vol. 44, No. 4, pp. 349-355, April 1999.
- [37] N. Hadkar, S. Jagtap “Design of Square Shaped Miniaturized Split Ring Resonators”, *Najuka Hadkar Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN: 2248-9622*, Vol. 5, Issue 5, ( Part -4) May 2015, pp.11-14
- [38] M.Ouda, N. Abutahoun “A new metamaterial having swastika shaped resonator” *The 4th International Engineering Conference –Towards engineering of 21st century, 2012.*
- [39] A. Murk, A. Duric and F. Patt *Characterization of ALMA Calibration Targets*, 19th International Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, 28-30 April 2008. [Online] <http://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/2008/2008530533.pdf>
- [40] A. Murk, A. Duric *ALMA Calibration Device Prototype Calibration Load Test Report FEND-40.06.04.00-005-A-REP* [Online] <https://safe.nrao.edu/wiki/pub/ALMA/CalAmp/FEND-40.06.04.00-005-A-REP.pdf>
- [41] A. Simonetto, E. Sassolini *Free-space measurement of low-reflectivity targets*, Internal Report IFP FP16/01
- [42] A. Simonetto *Test Report - Baseline Breadboard samples v.1*