

# INTERNAL REPORT

## **PROGETTAZIONE EM DI UNA TRANSIZIONE MICROSTRISCIA GUIDA D'ONDA RETTANGOLARE PER LA BANDA Q DI SRT**

**R. Ghiani<sup>1</sup>, G. Valente<sup>2</sup>, A. Fanti<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Università degli Studi di Cagliari

<sup>2</sup> INAF-Osservatorio Astronomico di Cagliari

Report N. 51,  
14 Dicembre 2015

Revisore: T. Pisanu



Osservatorio  
Astronomico  
di Cagliari

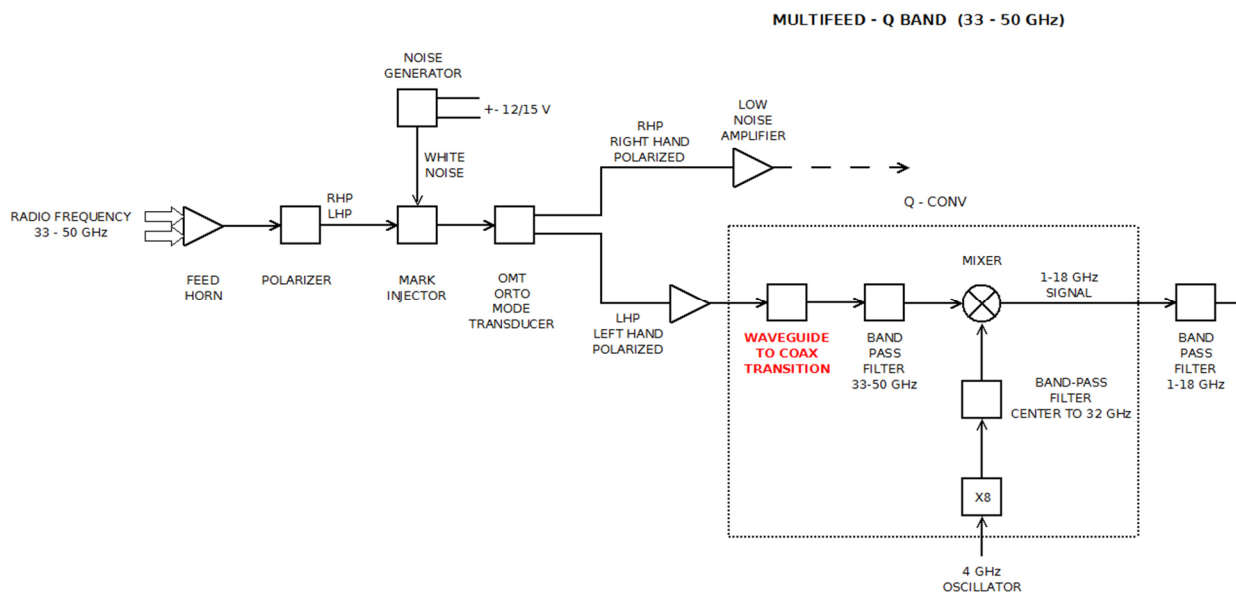
## Sommario

SOMMARIO .....	2
INTRODUZIONE .....	3
MODELLIZZAZIONE.....	4
SPECIFICHE DI PROGETTO.....	6
PROGETTAZIONE DELLE TRANSIZIONI .....	7
Transizione in Duroid.....	7
Transizione in Allumina.....	8
PROGETTAZIONE MECCANICA .....	9
ANALISI DEI RISULTATI.....	11
Risultati Duroid .....	11
Risultati Allumina .....	16
CONCLUSIONI .....	21
INDICI DELLE FIGURE E DELLE TABELLE.....	22
REFERENZE.....	23

## Introduzione

Nel corso degli ultimi anni l'utilizzo di circuiti integrati a microonde (MICs) è aumentato considerevolmente soprattutto grazie all'utilizzo degli stessi in varie applicazioni sia commerciali che militari [1] quali ad esempio: ricevitori satellitari, radar, sistemi di risoluzione delle immagini in campo medico, assistenza all'atterraggio di aeromobili, metal detector, munizioni intelligenti come missili a ricerca e nel campo della radioastronomia; tutto ciò è stato permesso dal fatto che presentano molteplici vantaggi come la semplicità di costruzione, costo, dimensioni e peso ridotti.

Questo tipo di circuiti a microonde contengono spesso parti in guida d'onda e parti in circuito planare [2], risulta quindi necessaria una transizione che permetta appunto di interfacciare due differenti linee di trasmissione con la maggior efficienza possibile [1]. Ad oggi esistono diversi metodi per la realizzazione di questo tipo di transizioni, ognuna caratterizzata da aspetti positivi e negativi; altrettante pubblicazioni possono essere trovate in merito[3][4][5][6], una descrizione dettagliata dello stato dell'arte è riportata nel campo. In questo internal report si propone la modellizzazione, la progettazione e l'analisi di una transizione trasversa tra una guida d'onda e una microstriscia in banda Q (33-50 GHz) su due differenti substrati (Duroid e Allumina), una parte importante è stata l'integrazione del connettore coassiale necessario a completare la transizione. La transizione nello specifico è candidata ad essere installata nella catena ricevente del multifeed banda Q [7] per collegare l'amplificatore a basso rumore, che ha una uscita in guida d'onda e il mixer che ha l'ingresso in coassiale, come indicato nello schema in Fig. 1



**Figura 1:** Schema a blocchi ricevitore banda Q

In letteratura vengono presentati diversi tipi di transizione che si differenziano soprattutto per la geometria e per l'uso del coassiale o di un circuito in microstriscia. Una prima differenziazione si può fare appunto a partire dalla geometria; in questo caso possono essere trovate transizioni che si sviluppano in lunghezza proseguendo nella direzione della guida, in [3] ad esempio viene sviluppata una formula generale per la progettazione di un end-launcher per una transizione tra una linea in coassiale e una guida d'onda che può essere sia rettangolare che circolare. Esistono poi transizioni in cui uscita e ingresso formano tra loro un angolo di  $90^\circ$  (chiamate anche transizioni trasverse) come in [4] dove è presentata una transizione E-plane (il cui termine verrà spiegato in seguito) tra una guida d'onda e una microstriscia. L'adattamento può essere ottenuto in diversi modi: si fa spesso uso di ridge che vanno a modificare la forma del campo all'interno della guida, se ne può vedere un possibile utilizzo nella [5] in cui vengono descritte tre transizioni fra coassiale e guida d'onda che utilizzano

dei ridge; altre volte può essere trovata una sonda seguita da una rete di adattamento che permette di combinare la guida alla linea planare come mostrato in [6] che presenta modello, realizzazione e caratterizzazione di una transizione E-plane tra una microstriscia e una guida d'onda. Le transizioni in microstriscia che non utilizzano ridge sono quelle più facilmente realizzabili [6] dato che coinvolgono molto meno la struttura della guida; infatti capita che i ridge richiedano al fine della realizzazione macchinari con discrete precisioni e lavorazioni meccaniche a volte complicate. Avendo chiaro che il componente fisso in queste transizioni è la guida d'onda, ad essa potrà essere accompagnata una linea in coassiale [3], in microstriscia [6] o in stripline come in [8] dove viene presentata una transizione a 30 GHz tra una guida WR-28 e una stripline; il che fa capire anche la versatilità di questo tipo di struttura. Come conseguenza diretta si avrà che i modi da accoppiare saranno differenti, infatti, il modo fondamentale di una guida d'onda è il TE<sub>10</sub> se la guida è rettangolare e il TE<sub>11</sub> se circolare mentre in una microstriscia e in una stripline il modo viaggiante è un modo quasi-TEM a sua volta differente dal modo TEM di un cavo coassiale[9]. Gli elementi che permettono di accoppiare l'energia tra 2 differenti linee di trasmissione possono essere molteplici; si va dal pin centrale del cavo coassiale, visibile bene in [10] (dove vengono date le specifiche per la realizzazione di diverse transizioni trasverse fra coassiale e guida d'onda), ad elementi un po' più complessi come antenne stampate su substrato [4] che possono presentare geometrie anche molto differenti. La configurazione utilizzata in questo lavoro è la sonda radiale. La transizioni tra una guida d'onda e una sonda rettangolare E-plane è stata introdotta per la prima volta nel 1990 [11]. Successivamente a tale pubblicazione si può trovare la sonda rettangolare largamente impiegata in diversi lavori. L'evoluzione di tale sonda è la sonda radiale introdotta nel 2001 [12] e poi impiegata in diversi progetti [13][14][15]. Analizzando in dettaglio le [12][16] si può vedere un modello di transizione operante nella banda 270-430 GHz, con ottime prestazioni a livello di simulazione, che è stata scalata per la successiva realizzazione a 3.4-5.4 GHz ottenendo le stesse prestazioni nelle misure. Altri lavori che fanno uso della sonda radiale sono stati il [13] in cui viene fatto notare a livello di simulazione che la sonda può essere montata sia parallela che perpendicolare alla direzione di propagazione con prestazioni simili; in linea con le considerazioni già riportate in [12][16] che si rifanno a un precedente lavoro basato su sonda rettangolare [17][18]. La [13] presenta inoltre nel dettaglio 2 misure riguardanti diversi metodi di incollaggio del pin del connettore SMA: il primo con argento epossidico conduttivo e il secondo con la classica lega di stagno-piombo; le prestazioni sono praticamente le stesse in entrambi i casi. La sonda radiale è stata inoltre impiegata anche per transizioni in-line come nel [19] in cui la sonda ha la stessa orientazione che nei precedenti lavori ma la linea in microstriscia prosegue verso il fondo della guida. Nei capitoli successivi verranno descritti i passi seguiti per la progettazione elettromagnetica della transizione per la banda Q del Sardinia Radio Telescope (SRT) su due differenti materiali, Rogers e Allumina.

## Modellizzazione

Nella realizzazione di circuiti con funzionamento ad alta frequenza le distanze tra i componenti e le lunghezze degli stessi sono fondamentali. Quindi anche in questo caso si è partiti da lunghezze e distanze critiche quali le frazioni di  $\lambda$  (ad esempio  $\lambda/4$  o  $\lambda/10$ ). La difficoltà che si incontra è quella nel capire a quale frequenza e su che materiale calcolare il  $\lambda$ , soprattutto quando si ha a che fare con una banda abbastanza ampia. Un criterio che generalmente si adotta è quello di calcolare il tutto per la frequenza di centro banda, per poi effettuare piccole variazioni nelle lunghezze al fine di ottenere il risultato desiderato.

Partendo dal posizionamento della sonda, dalla teoria è noto che il modo fondamentale di una guida d'onda rettangolare è il TE<sub>10</sub>. Ciò porta a posizionare l'antenna proprio in quella direzione; risulta non vincolante l'orientamento della sonda (parallelo o perpendicolare alla guida [12][13][17]) anche se per una scelta di progetto verrà posta parallelamente alla direzione di propagazione della guida.

La guida d'onda da utilizzare è quella relativa alla banda di funzionamento. All'interno delle guide possono propagarsi numerosi modi. I modi che si propagano sono comunque quelli a frequenze

maggiori della frequenza di taglio caratteristica della guida. Tale frequenza deve sicuramente essere inferiore alle frequenze della banda per cui si vuole creare la transizione. Solitamente, per una guida d'onda rettangolare, un lato è circa il doppio dell'altro e, il primo modo che si propaga è il TE<sub>10</sub> (che è anche quello con la frequenza di taglio più bassa chiamato anche modo fondamentale). Il primo modo superiore si determina sapendo che: se il lato corto è maggiore della metà del lato lungo allora allora sarà il TE<sub>01</sub> altrimenti il TE<sub>20</sub> [20].

La distanza dell'antenna dal back-short (letteralmente corto circuito posteriore) della guida dovrà essere pari a circa  $\lambda_g/4$  dove  $\lambda_g$  è la lunghezza d'onda nella guida (ricordando che la guida avrà al suo interno aria). Tale distanza permette di avere un'interferenza costruttiva infatti, il fondo della guida farà da cortocircuito (le guide sono generalmente realizzate con metalli altamente conduttivi come ad esempio l'alluminio); il cortocircuito è caratterizzato dall'avere un coefficiente di riflessione  $\Gamma$  pari a -1, questo determina un'onda riflessa sfasata di 180° rispetto a quella incidente che proviene dalla sonda, se in più si considerano il tragitto di andata e ritorno da e verso la sonda avremo 2 ulteriori sfasamenti di 90°, il che fa sì che l'onda sia completamente in fase con quella che viaggia lungo la guida.

L'impedenza per una sonda che si estende solo in parte all'interno della guida dipende solamente dal modo che si propaga nella guida stessa e perciò risulta quasi indipendente dalla frequenza [12][17]. Una sonda rettangolare presenta maggiori discontinuità geometriche di una sonda radiale, tale considerazione è in linea con le prestazioni dello stub rettangolare e dello stub radiale, in quanto, quest'ultimo, ha un comportamento migliore, presentando prestazioni a banda più larga. In particolare per una sonda radiale, l'angolo di apertura provoca variazioni nella parte reale dell'impedenza d'ingresso della stessa; se si considera un angolo iniziale di 90° c'è una correlazione quasi lineare fra le variazioni percentuali dell'angolo e della resistenza d'ingresso della sonda.

Il raggio della sonda è anch'esso strettamente legato alla parte reale della sua impedenza d'ingresso e risulta correlato anche all'ampiezza di banda della transizione.

I risultati migliori si ottengono quando la dimensione del raggio è tale da tenere la sonda nella prima metà del lato corto della guida. Rinunciando all'ampiezza di banda si possono ottenere anche -25 dB di return loss semplicemente variando il raggio della sonda.

Il substrato determina la parte immaginaria dell'impedenza d'ingresso della sonda (essendo capace di immagazzinare energia elettrica e magnetica al suo interno). Risulta possibile ridurre notevolmente tale parte agendo su spessore, larghezza e costante dielettrica del substrato. Se risulta possibile, la condizione migliore è quella di annullare completamente la parte reattiva dell'impedenza (che porterà eventualmente ad utilizzare una rete di adattamento per adattare solo la parte reale dell'impedenza, ad esempio, con un semplice adattatore a  $\lambda/4$ ). Si può tenere in considerazione che: un aumento dello spessore del substrato ha lo stesso effetto che avrebbe una diminuzione della permittività relativa  $\epsilon_r$  e che per realizzare antenne a microstriscia con alta efficienza di irradiazione si preferiscono substrati spessi a bassa permittività [21].

La componente reattiva dell'impedenza d'ingresso risulta inoltre legata all'altezza della guida (lato corto); una riduzione in altezza determina un abbassamento della reattanza [12][17][22] come dimostrato in [17] con l'uso di uno step capacitivo. La componente reattiva dell'impedenza d'ingresso risulta correlata alla velocità di fase dell'onda uscente dal substrato (è inversamente proporzionale alla radice quadrata della costante dielettrica del substrato utilizzato). Risulta possibile pensare di avere una capacità estrinseca fra la fine della sonda e la parete della guida dinanzi ad essa [17][18][23].

La cavità (che ospita substrato e microstrip) creata nel lato largo della guida, deve avere dimensioni tali da consentire un assemblaggio semplice, compatibilmente al corretto dimensionamento e funzionamento della microstrip e alla propagazione dei soli modi fondamentali, infatti, le dimensioni dell'apertura nella parete della guida hanno un effetto significativo sulla distribuzione di campo nelle vicinanze dell'antenna.

Specifiche 2.40 mm Connector – 1490-12G	
$\epsilon_r$	2.01
Lunghezza dielettrico	3.175 mm
Diametro dielettrico	746 $\mu\text{m}$
Diametro pin dentro al dielettrico	2286 $\mu\text{m}$
Diametro pin fuori dal dielettrico	127 $\mu\text{m}$

Tabella 1: Elenco dei componenti e corrispettivi connettori.

	Duroid 5880	Allumina Ceramica
$\epsilon_r$	2.2	9.8
$\tan\delta$	0.0009	0.0005
Spessore Substrato	0.005" = 127 $\mu\text{m}$	0.005" = 127 $\mu\text{m}$
Spessore Metallizzazioni	17 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
Larghezza minima delle piste	100 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Distanza minima tra due piste	250 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Distanza minima tra metallizzazioni e bordo del dielettrico	200 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Diametro fresa utilizzata per metallizzazioni	150 $\mu\text{m}$	Non verrà usata alcuna fresa
Tolleranza nella realizzazione	$\pm 10 \mu\text{m}$	Pochi $\mu\text{m}$
Possibilità di creare il circuito su due facce	Sì	Sì

Tabella 2: Elenco dei componenti e corrispettivi connettori.

## Specifiche di progetto

Banda Q ( 33-50 GHz ) – Lunghezza d'onda 9 – 6 mm

Guida d'onda : Rettangolare – WR22 (dimensioni interne 2.845 x 5.689 mm)

Transizione di tipo E-plane (circuito planare che entra dal lato largo della guida)

Tipo di sonda : Radiale

Return loss < 20 dB

Insertion Loss : più basso possibile

Connettore in ingresso :

SouthWest Microwave [24] 2.40 mm Connector – 1490-12G – Impedenza 50 OHM - Frequenza da 0 a 50 GHz [25]

Connettore in uscita : Flangia Millitech [26] standard UG-383/U

Vincoli tecnologici blocco meccanico

Diametro fresa 1 mm ---> Larghezza minima incisione 1 mm

Precisione :  $\pm 0.05 \text{ mm}$

Dimensioni : più piccole possibile (minor peso e minor volume occupato)



## Progettazione delle transizioni

La guida d'onda in oggetto (WR-22) presenta una frequenza di cut-off di 26.346 GHz. Quindi prima di tale frequenza nella guida non si propagherà alcun campo. Inoltre, la frequenza di cut-off del modo successivo è pari a 52.692 GHz. L'intervallo fra le 2 frequenze viene chiamato banda di monomodalità della struttura guidante [20]. Conseguenza per cui nella banda di interesse (33 – 50 GHz, l'ampiezza di banda risulta 17 GHz mentre la frequenza centrale è 41.5 GHz) si avrà un solo modo che si propaga all'interno della guida.

La transizione è stata modellata ponendo il circuito planare parallelamente al piano su cui verranno uniti i 2 blocchi che costituiscono la guida. Questo rende notevolmente più semplice la lavorazione dei singoli blocchi.

L'adattamento della transizione, per quanto riguarda la sonda radiale si effettua facendo variare: raggio, apertura (angolo), larghezza iniziale della sonda e la sua distanza dal back-short. La variazione di questi parametri ha lo scopo di rendere l'impedenza d'ingresso della sonda prettamente reale e come valore molto vicina ai 50  $\Omega$  ed, allo stesso tempo, che si abbia la minima variazione con la frequenza (questo è ottenibile guardando la carta di Smith che, normalizzata ai 50  $\Omega$  dovrà presentare la curva il più vicino possibile a 1); ciò farà sì che all'atto di unire il coassiale (anch'esso da 50  $\Omega$ ) non si abbiano variazioni brusche di impedenza e quindi non si creino disadattamenti. Nel caso in cui non si riesca ad ottenere 50  $\Omega$  come impedenza d'ingresso della sonda si andrà a realizzare una piccola rete di adattamento in microstriscia tra coassiale e sonda radiale sullo stesso substrato utilizzato per la sonda.

Il piano di massa della sonda e dell'eventuale linea in microstriscia sarà assente solamente all'interno della guida (per evitare il cortocircuito).

La larghezza del patch è stata ricavata sommando, nel punto in cui la sonda ha la larghezza massima, le distanze minime tra metallizzazione e bordo del dielettrico, come da specifiche.

I parametri che non sono stati fissati per mezzo di specifiche o da ragioni teoriche sono: larghezza del substrato (nei limiti delle distanze minime tra metallizzazione e bordo); raggio, apertura e larghezza iniziale della sonda (nei limiti della larghezza minima di una pista) e per un certo margine anche la distanza dal back-short.

Il back-short presenterà delle smussature su 2 dei 4 lati. Esse sono dovute alla lavorazione con la fresa e alla direzione in cui si intende muovere l'utensile. Secondo le specifiche il raggio minimo di tali smussature dovrà essere di 0.5 mm.

### Transizione in Duroid

Le dimensioni minute del patch (si parla di 2 mm di larghezza circa) rendono complicato l'incollaggio alla guida. Per andare nella direzione della stabilità e facilitare il compito, è stato prolungato il substrato oltre la cavità della guida per almeno 5 mm (questo prolungamento del substrato sarà dotato di piano di massa, utile per fare presa sulla colla depositata sull'alluminio di cui è costituito il blocco meccanico). Per ospitare tale parte si dovrà creare uno scasso "ad hoc" nella parete della guida con le dimensioni esatte di larghezza (pari alla larghezza del substrato), altezza (pari alla somma dello spessore del piano di massa e del dielettrico) e profondità (appunto 5 mm circa).

Con i parametri liberi di cui si disponeva non è stato possibile ottenere le prestazioni richieste, è stato necessario inoltre introdurre una rete di adattamento. La rete di adattamento in questo caso è costituita da una linea iniziale a 50  $\Omega$  sulla cui metallizzazione andrà saldato (con una saldatura a stagno (Pb-Sn)) oppure incollato (con colla conduttiva ad esempio argento epossidico conduttivo) il launch pin del coassiale (parte dell'anima che fuoriesce dal teflon del coassiale) che di solito presenta o un diametro inferiore rispetto alla parte interna al teflon; alternativamente il pin termina con una piattina, in quest'ultimo caso viene chiamato launch tab).

Proseguendo troviamo una piccola induttanza creata per mezzo di una discontinuità nella larghezza della striscia conduttiva (se si riduce la larghezza per un piccolo tratto la corrente che scorre sulla pista sarà costretta nella strozzatura e quindi acquisirà una componente trasversa alla direzione della

pista, la conseguenza sarà ottenere in una piccola zona un campo magnetico maggiore di quello elettrico) e un'altra linea con impedenza e lunghezza tale da completare l'adattamento della sonda. L'altezza e la larghezza della cavità sono scelte in modo tale da garantire il corretto funzionamento della microstriscia (il campo dovrà prevalentemente chiudersi sul piano di massa e non sulle pareti laterali o sul soffitto della cavità). La larghezza in particolare non cambia per tutta l'altezza della cavità (minor onere realizzativo della parte meccanica).

L'utilizzo di una fresa per la realizzazione della sonda e della rete di adattamento incide sulla forma della metallizzazione. Troviamo in particolare 2 zone critiche: la prima è quella alla base della sonda nel punto in cui è collegata alla rete di adattamento; la seconda è invece la zona dell'induttanza. In entrambi i casi non avremo più i bordi squadri ma i contorni saranno più arrotondati. Un ulteriore problema che può sorgere con l'utilizzo della fresa è l'incisione di parte del dielettrico sottostante. In questo caso infatti può capitare che venga asportato un sottile strato di dielettrico tutt'attorno alla metallizzazione. Il connettore coassiale sarà modellato per mezzo del dielettrico e del pin centrale. Le dimensioni e le varie costanti sono quelle indicate dal produttore. La saldatura è tenuta in conto nel modello andando a riempire con un blocco conduttivo la zona tra launch pin e microstriscia sottostante. Nella pratica si cerca di escludere dalla saldatura la zona iniziale del substrato per evitare una eventuale colatura sul bordo, che può provocare un corto tra piano di massa (già incollato con colla conduttiva al blocco della guida), microstriscia e pin con l'effetto di compromettere il funzionamento della transizione. Il teflon (che costituisce il dielettrico) e il pin centrale verranno inseriti all'interno di un foro (di opportune dimensioni creato nel blocco d'alluminio) che si affaccia all'interno nella cavità creata per accogliere il circuito in microstriscia. Nel modello finale si dovranno includere gli ultimi dettagli per quanto riguarda il volume d'aria sia nella zona del coassiale che nella zona oltre il substrato. Esse sono intrinseche della lavorazione con la fresa e ricalcheranno pertanto le dimensioni della fresa stessa (tenendo in considerazione che dovranno essere più piccole possibili ma grandi abbastanza da poter inserire correttamente il patch).

### Transizione in Allumina

Il modello della transizione che fa uso del substrato in allumina è di massima lo stesso del duroid, a meno di alcuni parametri dovuti a specifiche realizzative e appunto alla variazione del substrato che porta, sostanzialmente, a rivedere dimensioni e le distanze.

La cavità che ospita il circuito in microstriscia è più piccola rispetto al caso del duroid, sia in larghezza che in altezza. La larghezza è la minima realizzabile pari al diametro della fresa (1 mm secondo le specifiche) e come nel caso precedente non varia lungo tutta l'altezza.

Anche in questo caso non è stato possibile ottenere le prestazioni richieste con i soli parametri liberi di cui si disponeva. E' stata utilizzata quindi una rete di adattamento costituita da una induttanza simile a quella utilizzata nel caso precedente e una porzione di linea atta ad adattare la sonda.

La realizzazione del circuito in microstriscia avverrà utilizzando tecniche come la fotoincisione e la fotolitografia, il modello non necessita perciò di ulteriori dettagli e verifiche sulla metallizzazione.

La transizione fra coassiale e microstriscia in questo caso ha richiesto una piccola rete di adattamento. Il motivo è che la microstriscia da 50  $\Omega$  su cui viene saldato il launch pin risulta di dimensioni inferiori al diametro del pin stesso; questo porta a un notevole abbassamento dell'impedenza in quel tratto, dovuto alla presenza di microstriscia, saldatura e pin. L'adattamento è stato ottenuto con una induttanza in microstriscia alla fine del launch pin, seguita da 2 sezioni in linea per adattare la parte reale dell'impedenza.

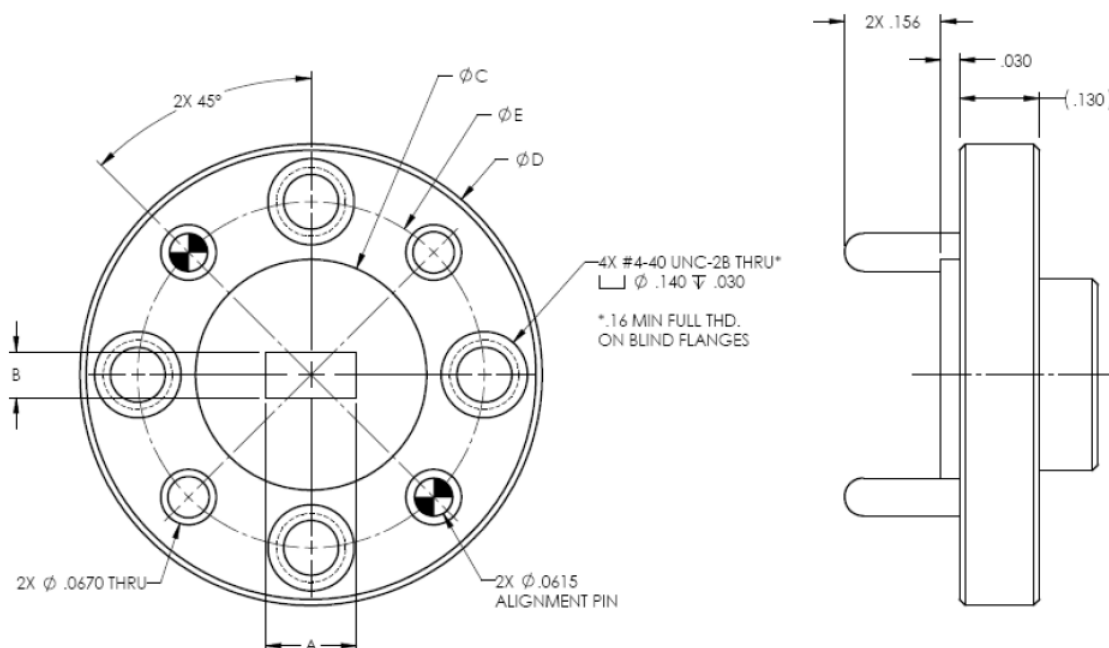
Anche in questo caso il modello finale dovrà essere integrato dalle zone d'aria dovute alla lavorazione del blocco meccanico.



## Progettazione meccanica

Per la progettazione meccanica il parametro principale da rispettare è la dimensione della fresa utilizzata; che determinerà il raggio minimo di curvatura e la dimensione minima di incisione.

I dettagli della flangia utilizzata sono mostrati in Fig. 2 mentre le dimensioni per un guida d'onda WR-22 sono riportate nella tabella più in basso.



	A	B	Diametro C	Diametro D	Diametro E
WR-22	5.689 mm	2.845 mm	12.7 mm	28.575 mm	23.8125 mm

Figura 2: Flangia vista in sezione e vista laterale [27]

La guida verrà realizzata in 2 parti, dividendola a metà rispetto al lato lungo. In una prima parte verranno creati gli scassi necessari ad ospitare tutto il substrato, compresi piano di massa e metallizzazioni; inoltre alla base verranno effettuate delle ulteriori asportazioni di alluminio al fine di creare 2 sacche che andranno ad ospitare l'eventuale colla in eccesso depositata al momento in cui verrà incollato il circuito in microstriscia. Nella prima parte andrà creato anche il foro che ospiterà dielettrico e pin del coassiale. Nella seconda parte andrà incluso lo spazio di aria, che andrà a posizionarsi sopra la microstriscia, che permette il corretto funzionamento della stessa. Lo scasso per la colla è mostrato in Fig. 4; la profondità è di 50  $\mu\text{m}$  ma non risulta vincolate (le dimensioni possono essere scelte a seconda delle necessità, tenendo comunque sempre presente la dimensione della fresa utilizzata); senza tale scasso, se si sbaglia il quantitativo di colla depositata, incollando al blocco il circuito a microstriscia, la colla in eccesso salirebbe dai bordi del dielettrico sino ad arrivare sopra il dielettrico e quindi affianco alla microstriscia.

Il blocco meccanico potrà essere assemblato a partire da 3 parti: parte superiore e inferiore della guida e flangia necessaria alla connessione con un'altra guida.

Entrambe le parti (le due parti della guida e la flangia) verranno create a partire da un pieno di alluminio. I passi principali per la costruzione saranno:

- Incollaggio del circuito a microstriscia nel blocco con lo scasso per la colla;
- Inserimento del dielettrico e del pin del coassiale e successiva saldatura (o incollaggio con colla conduttiva);
- Unione delle due parti che costituiscono la guida;
- Aggiunta della flangia e del connettore coassiale.

Un esempio di connettore coassiale è mostrato in Fig. 3. Le dimensioni del connettore possono essere trovate in [28].

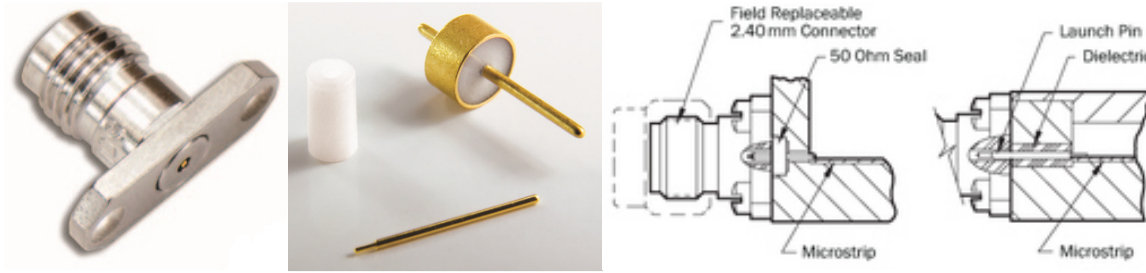


Figura 3: Da sinistra verso destra: connettore coassiale femmina [29]; esempio di dielettrico e pin in cui può essere notato il cambio di diametro a una delle estremità [30] (launch pin); vista in sezione nel punto di collegamento del connettore [31].

L'accorpamento delle 2 parti che costituiscono la guida verrà effettuata per mezzo di alcuni pin di allineamento e di viti M3 ed M2.5 posizionate a seconda delle dimensioni del blocco e degli spazi disponibili. Anche la flangia andrà ad unirsi al blocco che costituisce la guida per mezzo di alcune viti M2.5. Le immagini della Fig. 4 sono state ricavate da Autodesk Inventor [32]; ogni parte è stata disegnata con le misure reali dei singoli componenti.

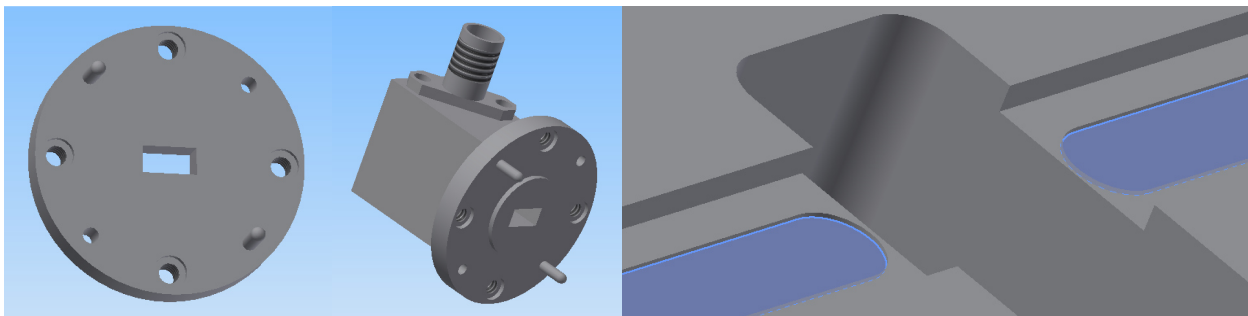


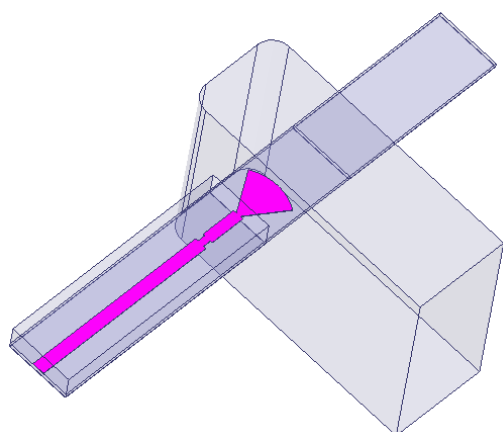
Figura 4: Da sinistra a destra: flangia; possibile aspetto della transizione assemblata; vista interna del blocco con evidenziati gli scassi che ospiteranno la colla in eccesso sotto il circuito a microstriscia.

## Analisi dei risultati

Verranno ora analizzati i risultati ottenuti durante i principali passi di modellizzazione delle due transizioni. Per la realizzazione e simulazione del modello è stato utilizzato il software HFSS [33] (High Frequency Structural Simulator) di ANSYS che fa uso del Frequency Domain per l'analisi strutturale.

### Risultati Duroid

Il primo modello analizzato nel caso del substrato in duroid è quello mostrato nella Fig. 5. Le immagini dei modelli a seguire sono state ricavate da HFSS mentre, i grafici sono stati creati con MatLab [34] di MathWorks, attraverso l'esportazione dei dati dei grafici di HFSS.



Larghezza substrato = Larghezza delle cavità	1.93 mm
Altezza cavità che ospita substrato e metallizzazioni	$0.65+0.127+0.017$ = 0.794 mm => 0.79 mm
Altezza cavità che ospita substrato e piano di massa	$0.127+0.017$ = 0.144 mm
Raggio smussatura fondo guida	0.51 mm

Figura 5: Modello iniziale transizione

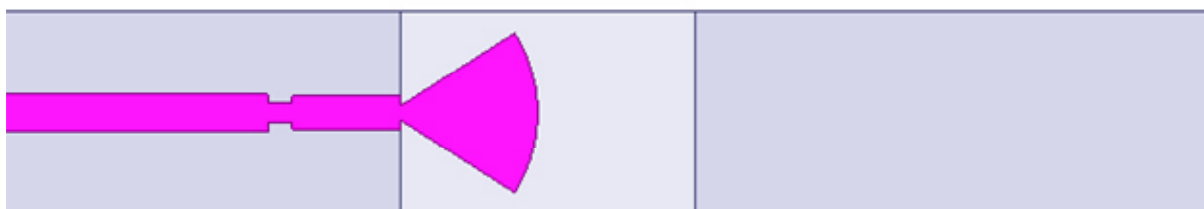


Figura 6: Vista dall'alto del circuito in microstriscia su duroid.

La zona in microstriscia su sfondo chiaro è posizionata all'interno della guida. Le due zone a destra (lunga 5 mm) e sinistra di colore più scuro comprendono substrato e piano di massa come da Fig. 6. La sonda radiale ha un raggio di 1.43 mm, un'apertura di 65° e una larghezza iniziale di 140 µm. Alla sonda è collegata una porzione di linea di larghezza 320 µm e lunghezza 1.05 mm seguita da una piccola induttanza di dimensioni 200 µm di larghezza e 230 µm di lunghezza. La linea iniziale presenta un'impedenza di 50 Ω ed è larga 366 µm. Il grafico in Fig. 7, relativo a questo primo modello, mostra un  $S_{11}$  inferiore ai 20 dB nella banda di interesse, l' $S_{21}$  è minore di 0.2 dB; si ricordi che per tutte le transizioni analizzate la rete è reciproca ( $S_{11} = S_{22}$ ,  $S_{12} = S_{21}$ ). Volendo verificare gli effetti dell'uso della fresa per la realizzazione del patch il modello è stato modificato come mostrato in Fig. 8, la prima immagine mostra sonda e substrato con le variazioni apportare mentre, nelle 2 immagini a seguire possono essere notate nel dettaglio le curvature effettuate sulla metallizzazione e l'incisione nel dielettrico attorno ad essa. I risultati ottenuti facendo variare il raggio di curvatura (vedi raggio della fresa) e ignorando l'incisione sul dielettrico sono riportati in Fig. 9.

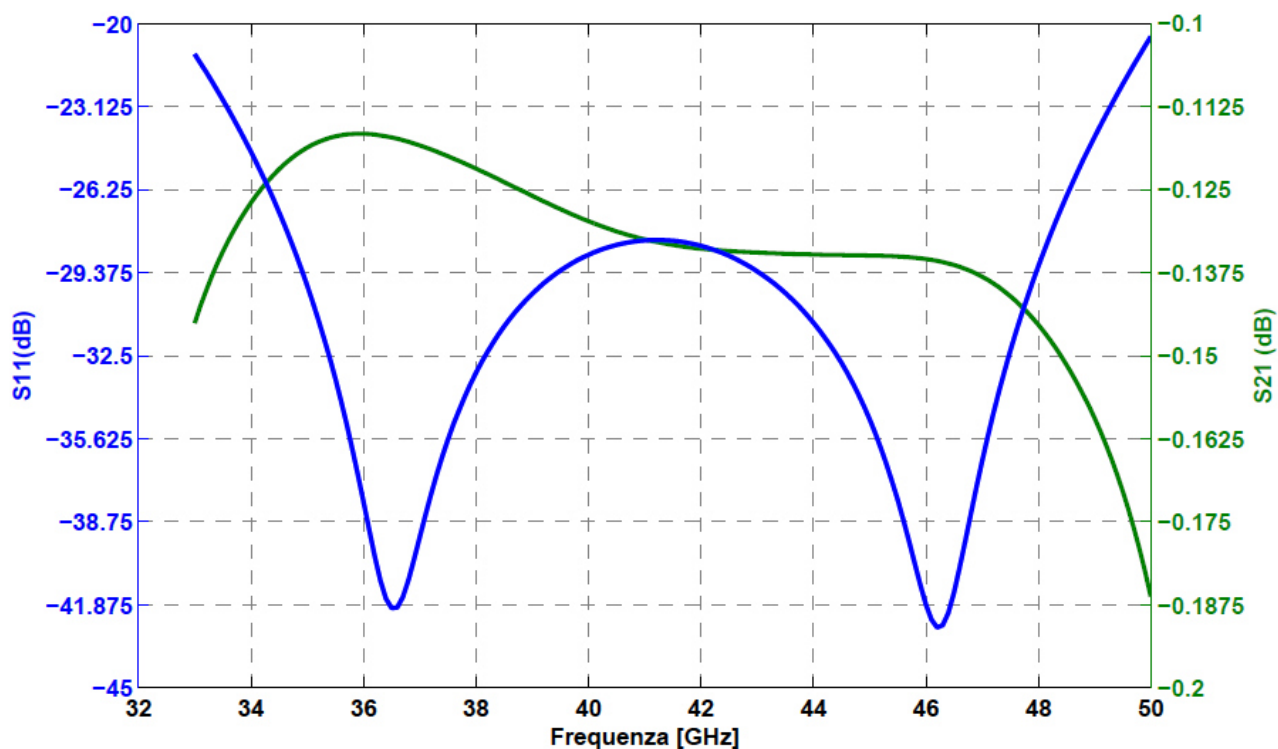


Figura 7:  $S_{11}$  ed  $S_{21}$  della transizione iniziale microstriscia-guida d'onda, duroid.

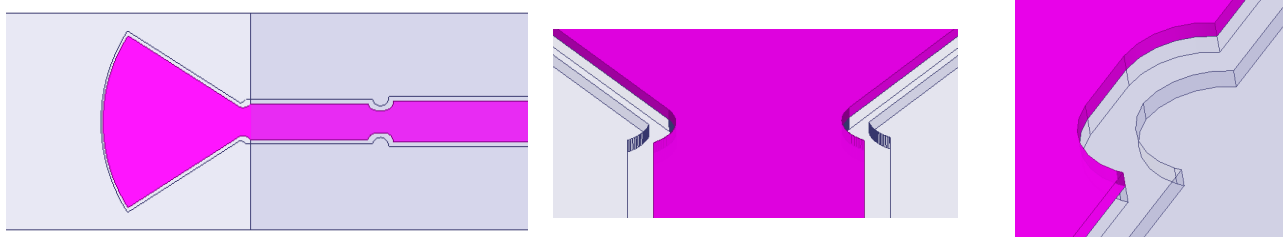


Figura 8: Dettagli curvatura e incisione del dielettrico attorno alla metallizzazione.

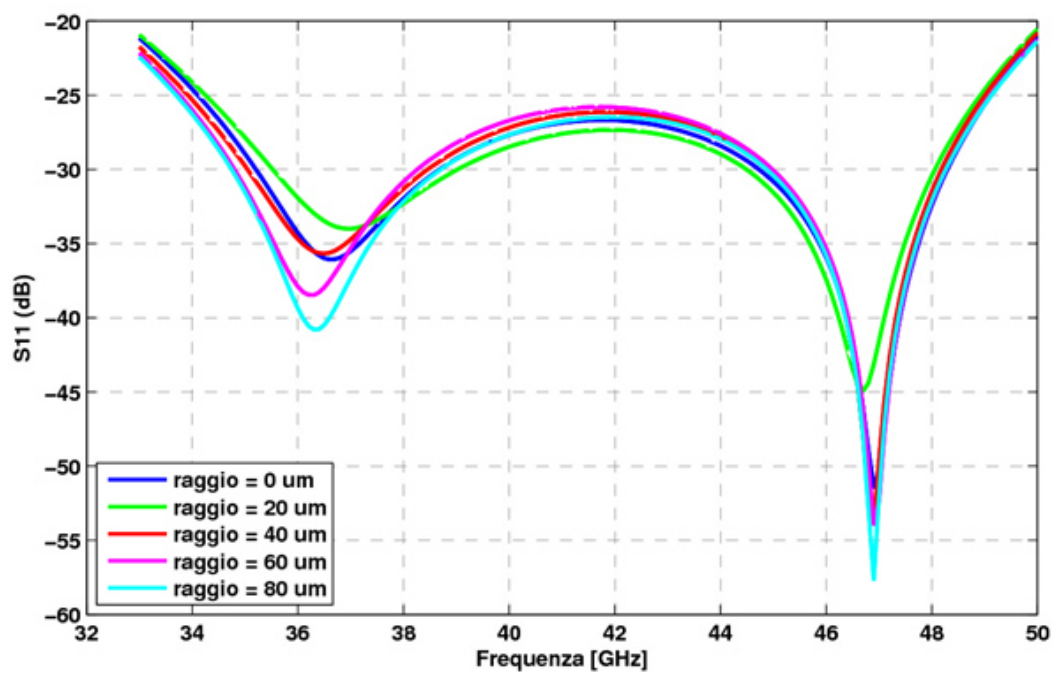


Figura 9: Variazione dell' $S_{11}$  al variare del raggio di curvatura.

Il grafico di Fig. 9 mostra che si ha solo una leggera variazione (se curve sono quasi sovrapposte) rispetto alla curva con assenza di raggio di curvatura.  
A seguire in Fig. 10 è invece mostrato il comportamento al variare della profondità di incisione, tenendo fissa la larghezza di incisione a 20  $\mu\text{m}$ .

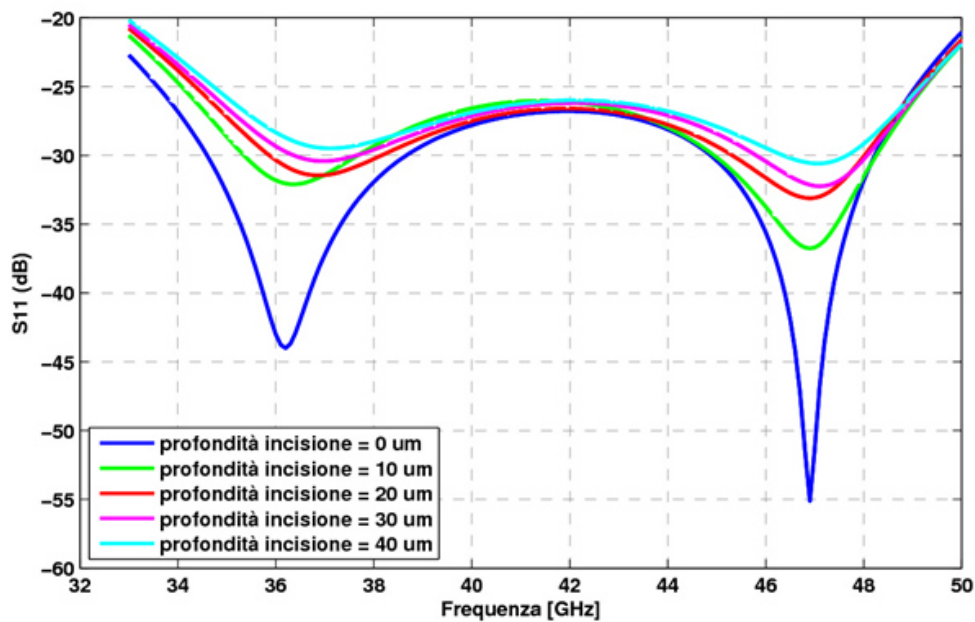
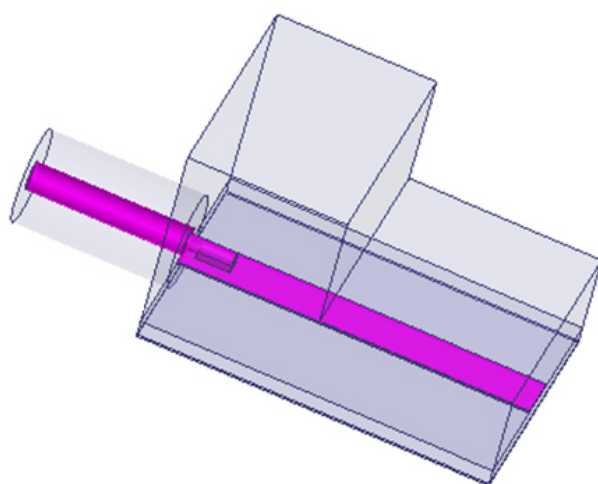


Figura 10: Variazione dell' $S_{11}$  al variare della profondità di incisione, con raggio di curvatura fisso di 20  $\mu\text{m}$ .

In questo caso le prestazioni si riducono anche notevolmente all'aumentare della profondità di incisione. Le piccole variazioni della curva fanno inoltre capire l'attendibilità delle simulazioni, che quindi hanno una mesh abbastanza fitta da tenere in considerazione anche questi piccoli dettagli nel modello. Dalle simulazioni possiamo notare che mentre la forma più arrotondata delle zone critiche non incide troppo sulle prestazioni; l'eventuale asportazione di dielettrico ha effetti notevoli nel peggiorare il comportamento del componente. Il modello di transizione tra coassiale e microstriscia è mostrato in Fig. 11.



Lunghezza lanciatore	0.381 mm => 0.38 mm
Larghezza microstriscia	0.366 mm => 0.37 mm
Altezza cavità a sinistra	1.6 mm
Altezza cavità a destra	$0.65+0.127+0.017$ = 0.794 mm
Lunghezza cavità a sinistra	1.3
Larghezza cavità	1.93 mm

Figura 11: Modello di transizione tra coassiale e microstriscia



Le curve caratteristiche sono mostrate sotto nella Fig. 12. L' $S_{11}$  è inferiore ai 35 dB.

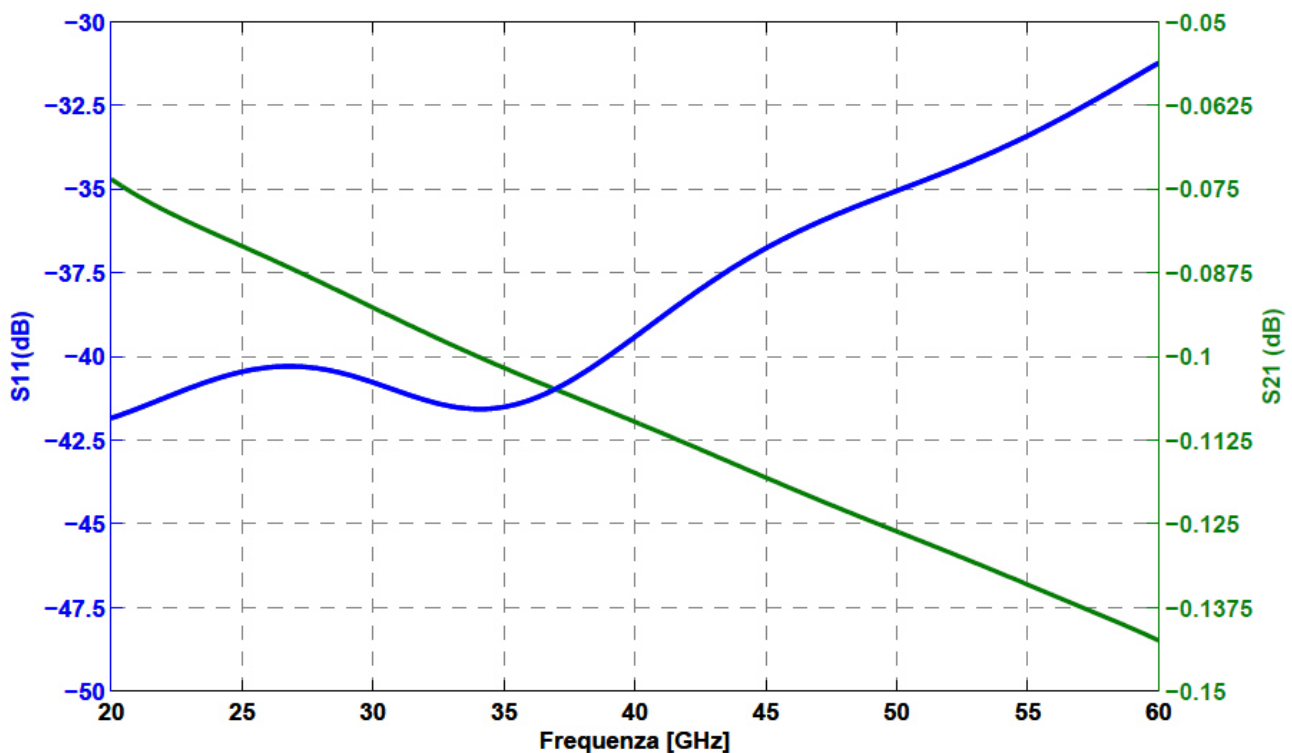


Figura 12:  $S_{11}$  ed  $S_{21}$  della transizione coassiale-microstriscia.

Il modello finale della transizione coassiale – microstriscia – guida d'onda è mostrato in Fig. 13.

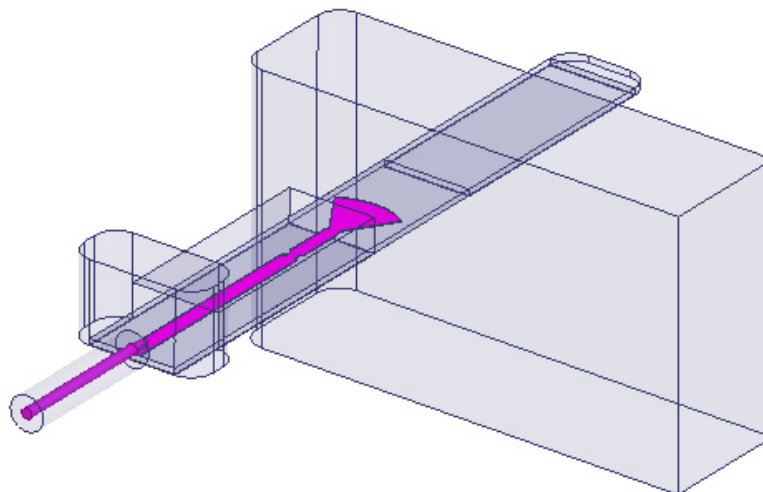


Figura 13: Modello finale della transizione

Come è stato fatto notare precedentemente, andranno aggiunte al modello finale delle sacche d'aria semicircolari (raggio 0.5 m) dovute alla lavorazione del blocco meccanico. Se ne possono notare in particolare due (uno a destra e uno a sinistra) all'inizio della cavità che ospita lanciatore e microstriscia. Alla fine del substrato invece la forma sarà simile a quella del back-short come si può vedere in Fig. 13. La simulazione di quest'ultima transizione mostrata nel grafico in Fig. 14 sotto, fornisce delle curve molto simili a quelle del modello iniziale (che non teneva conto dei contorni più lineari del patch, del coassiale e delle sacche d'aria dovute alla lavorazione).

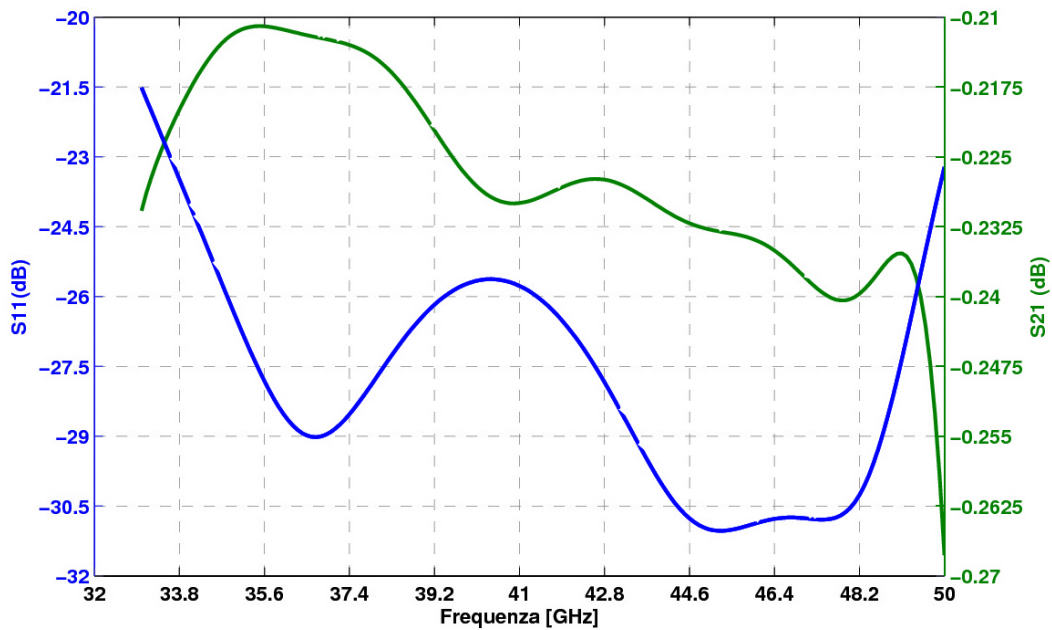


Figura 14:  $S_{11}$  ed  $S_{21}$  della transizione finale.

Le perdite per inserzione dipendono soprattutto dalla lunghezza della linea in microstriscia. Nel grafico di Fig. 15 è mostrato l' $S_{21}$  della transizione completa dove, le tre curve dall'alto verso il basso indicano (a parità di tutti gli altri parametri non menzionati):

- l' $S_{21}$  nel caso in cui non si abbiano perdite nelle metallizzazioni del circuito in microstriscia, ma si considerino in tale circuito solo le perdite nel dielettrico;
- l' $S_{21}$  nel caso in cui non si abbiano perdite nel dielettrico del circuito in microstriscia, ma si considerino in tale circuito solo le perdite nelle metallizzazioni;
- l' $S_{21}$  nel caso in cui si considerino in tale circuito le perdite nel dielettrico e nelle metallizzazioni del circuito in microstriscia.

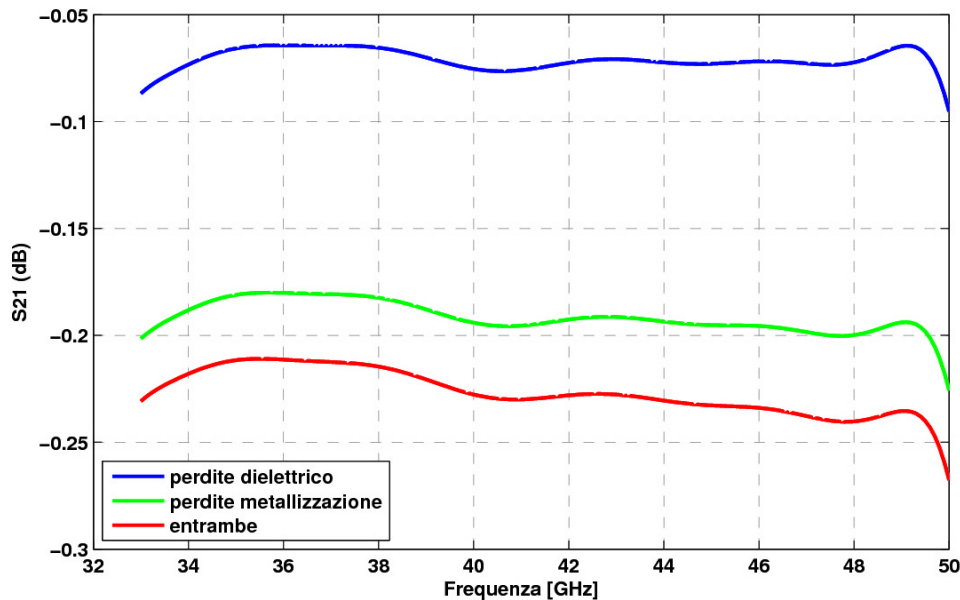
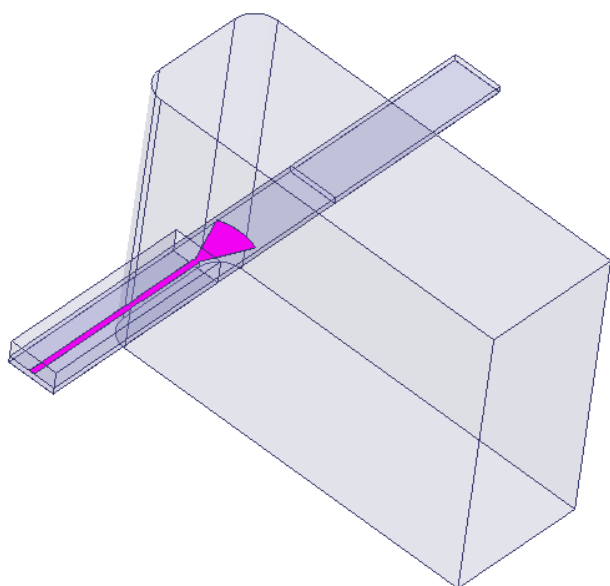


Figura 15:  $S_{21}$  in funzione delle perdite.

Risulta facile osservare, dalla Fig. 15, che il contributo maggiore alle perdite per inserzione è dovuto in larga parte alle metallizzazioni; bisogna comunque tenere conto che la curva blu tiene conto anche delle eventuali perdite in altre parti della struttura come ad esempio il pin del coassiale.

## Risultati Allumina

Il primo modello analizzato nel caso del substrato in allumina, molto simile a quello in duroid è mostrato nella Fig. 16 a seguire.



Larghezza substrato = Larghezza delle cavità	1 mm
Altezza cavità che ospita substrato e metallizzazioni	$0.35+0.127+0.004$ = 0.481 mm
Altezza cavità che ospita substrato e piano di massa	$0.127+0.004$ = 0.131 mm
Raggio smussatura fondo guida	0.5 mm

Figura 16: Modello iniziale transizione

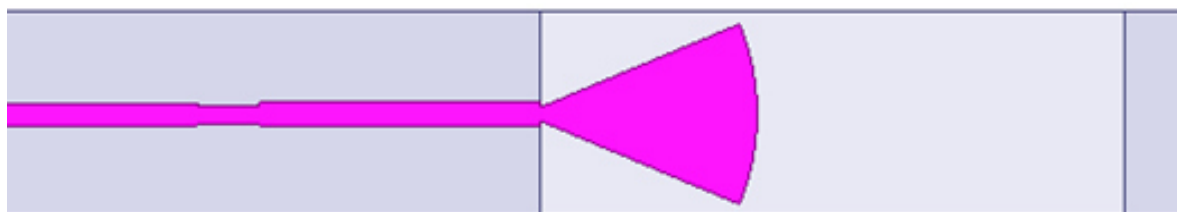


Figura 17: Vista dall'alto del circuito in microstriscia su allumina.

La zona in microstriscia su sfondo chiaro è posizionata all'interno della guida. Le due zone a destra (lunga 5 mm) e sinistra di colore più scuro comprendono substrato e piano di massa come da Fig. 17. La sonda radiale ha un raggio di 1.14 mm, un'apertura di 45° e una larghezza iniziale di 70 µm. Alla sonda è collegata una porzione di linea di larghezza 120 µm e lunghezza 1.37 mm seguita da una piccola induttanza di dimensioni 90 µm di larghezza e 300 µm di lunghezza. La linea iniziale presenta un'impedenza di 50 Ω ed è larga 111 µm.

Il grafico di Fig. 18 mostra un  $S_{11}$  inferiore ai 27 dB su una banda anche più larga di quella in specifica, l' $S_{21}$  è minore di 0.3 dB.

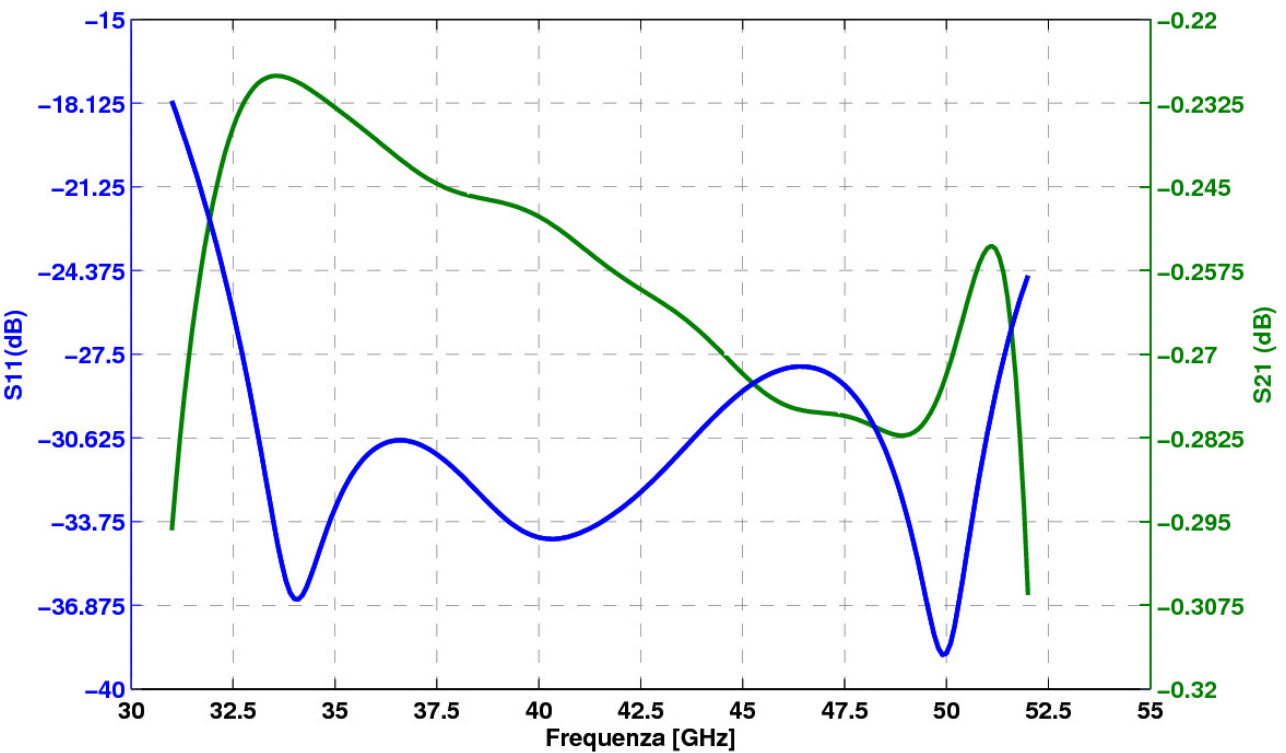
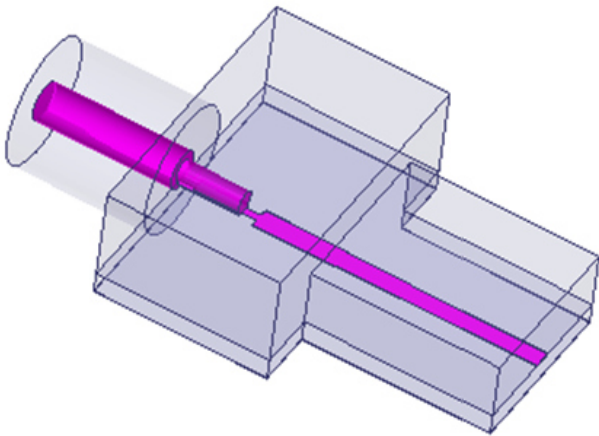


Figura 18:  $S_{11}$  ed  $S_{21}$  della transizione iniziale microstriscia-guida d'onda, allumina.

Il modello di transizione coassiale microstriscia è mostrato in Fig. 19. Il substrato e il piano di massa hanno la stessa larghezza della cavità.



Lunghezza lanciatore	0.381 mm => 0.38 mm
Altezza cavità a sinistra	0.55+0.127+0.004 = 0.717 mm => 0.72mm
Larghezza cavità a sinistra	1.7mm
Lunghezza cavità a sinistra	1.05 mm
Altezza cavità a destra	0.35+0.127+0.004 = 0.517 mm
Larghezza cavità a destra	1 mm

Figura 19: Transizione coassiale-microstriscia,

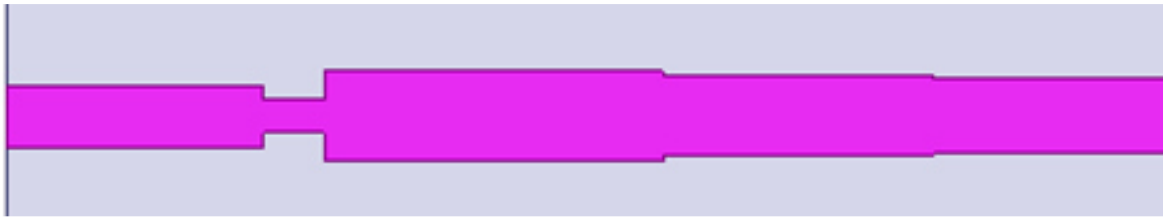


Figura 20: Rete di adattamento transizione coassiale microstriscia, allumina.

Per adattare il coassiale è stata utilizzata una piccola rete di adattamento mostrata in Fig. 20. Il primo pezzo di linea sarà quello su cui andrà ad incollarsi il lanciatore del coassiale e sarà lunga appunto 0.381 mm mentre avrà una larghezza di 0.09 mm. A valle del pin si trova una piccola discontinuità utilizzata per creare un'induttanza di dimensioni: 0.05 mm di larghezza (larghezza minima di una pista secondo le specifiche) e 0.09 mm di lunghezza. Seguendo verso destra troviamo due sezioni di linea; la prima lunga 0.5 mm e larga 0.135 mm mentre la seconda sarà lunga 0.4 mm e larga 0.12 mm; che poi continuerà con la linea a 50  $\Omega$  larga 0.111 mm come già indicato in precedenza.

La risposta che si ottiene a questa transizione, mostrata in Fig. 21, per quanto riguarda l' $S_{11}$  ha una banda più stretta e non è stato possibile avere risultati simili a quelli ottenuti nel caso del duroid. Nella banda di interesse si ottiene un  $S_{11}$  inferiore ai 27 dB.

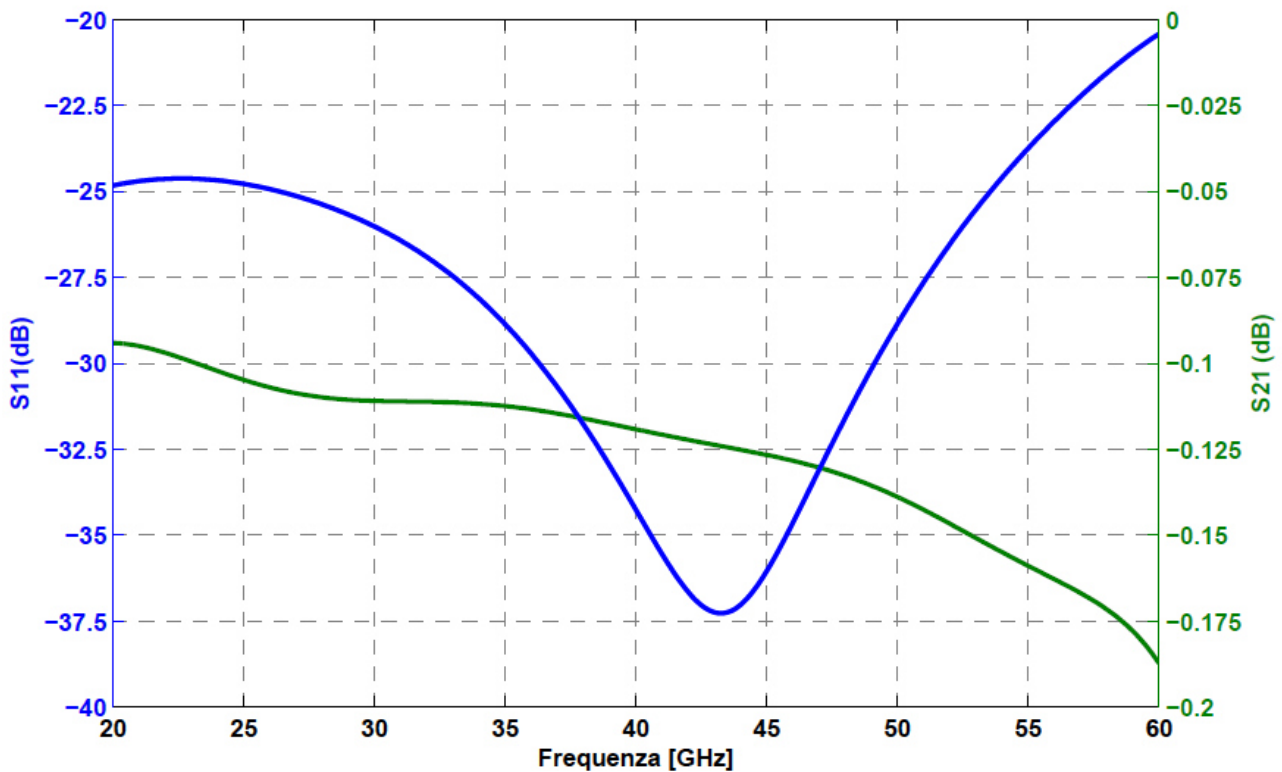
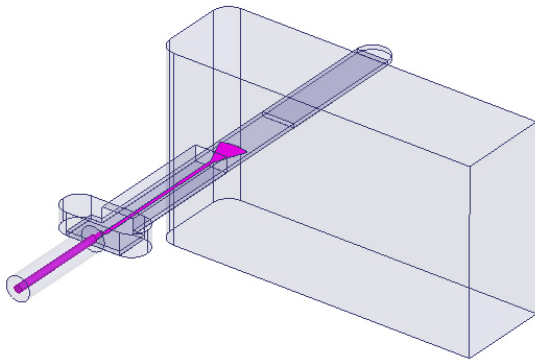


Figura 21:  $S_{11}$  ed  $S_{21}$  della transizione coassiale-microstriscia, allumina.



Il modello finale, presentato in Fig. 22, è costituito dalle due transizioni coassiale – microstriscia – guida d'onda.



Nel modello finale sono state inserite le sacche semicircolari dovute alla lavorazione della fresa. Se ne trovano due ai lati della cavità che ospita la transizione coassiale microstriscia e uno alla fine del dielettrico. Ricordando che senza di queste ulteriori modifiche il chip dell'antenna (avendo forma rettangolare) non avrebbe trovato il giusto alloggio all'interno della guida.

Figura 22: Modello finale della transizione

I risultati ottenuti dalle simulazioni sono quelli mostrati in Fig. 23.

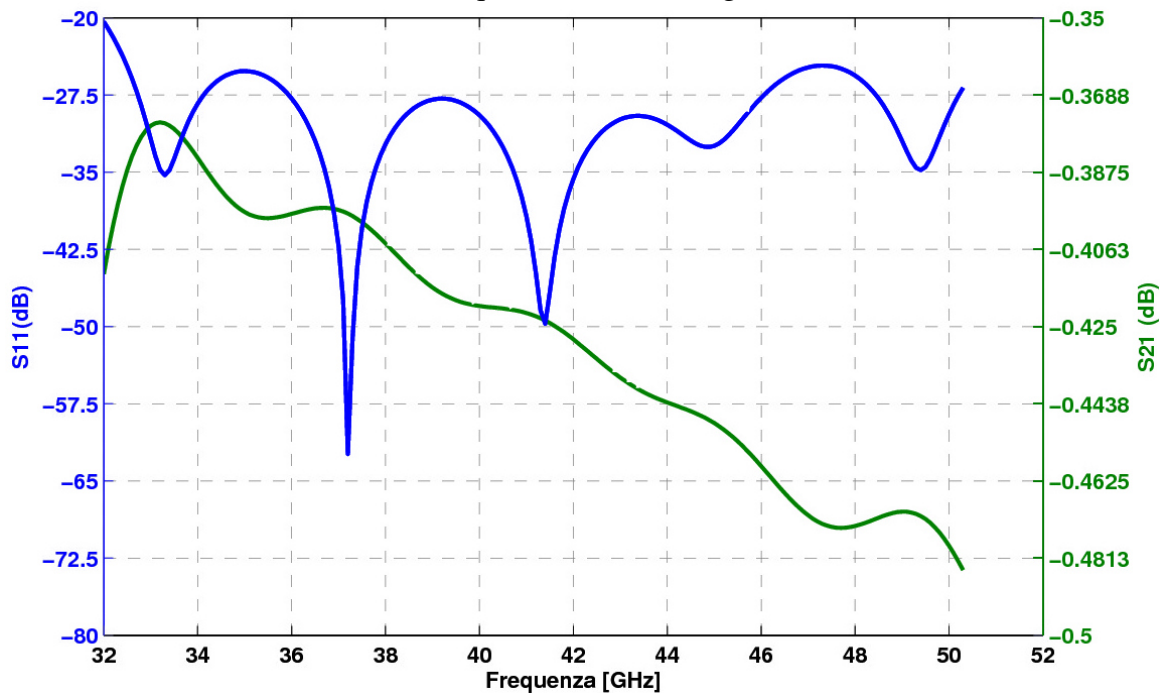


Figura 23:  $S_{11}$  ed  $S_{21}$  della transizione finale.

Confrontando i risultati del modello iniziale e di quello finale si evince che l'aggiunta della transizione coassiale microstriscia e delle sacche d'aria dovute alla lavorazione fanno traslare la curva di alcuni decibel più in alto; pertanto ora la curva dell' $S_{11}$  nella banda di interesse sta sotto i 22 dB. Nel grafico di Fig. 24 è mostrato l' $S_{21}$  della transizione completa dove, le tre curve dall'alto verso il basso indicano (a parità di tutti gli altri parametri non menzionati):

- l' $S_{21}$  nel caso in cui non si abbiano perdite nelle metallizzazioni del circuito in microstriscia, ma si considerino in tale circuito solo le perdite nel dielettrico;
- l' $S_{21}$  nel caso in cui non si abbiano perdite nel dielettrico del circuito in microstriscia, ma si considerino in tale circuito solo le perdite nelle metallizzazioni;
- l' $S_{21}$  nel caso in cui si considerino in tale circuito le perdite nel dielettrico e nelle metallizzazioni del circuito in microstriscia.

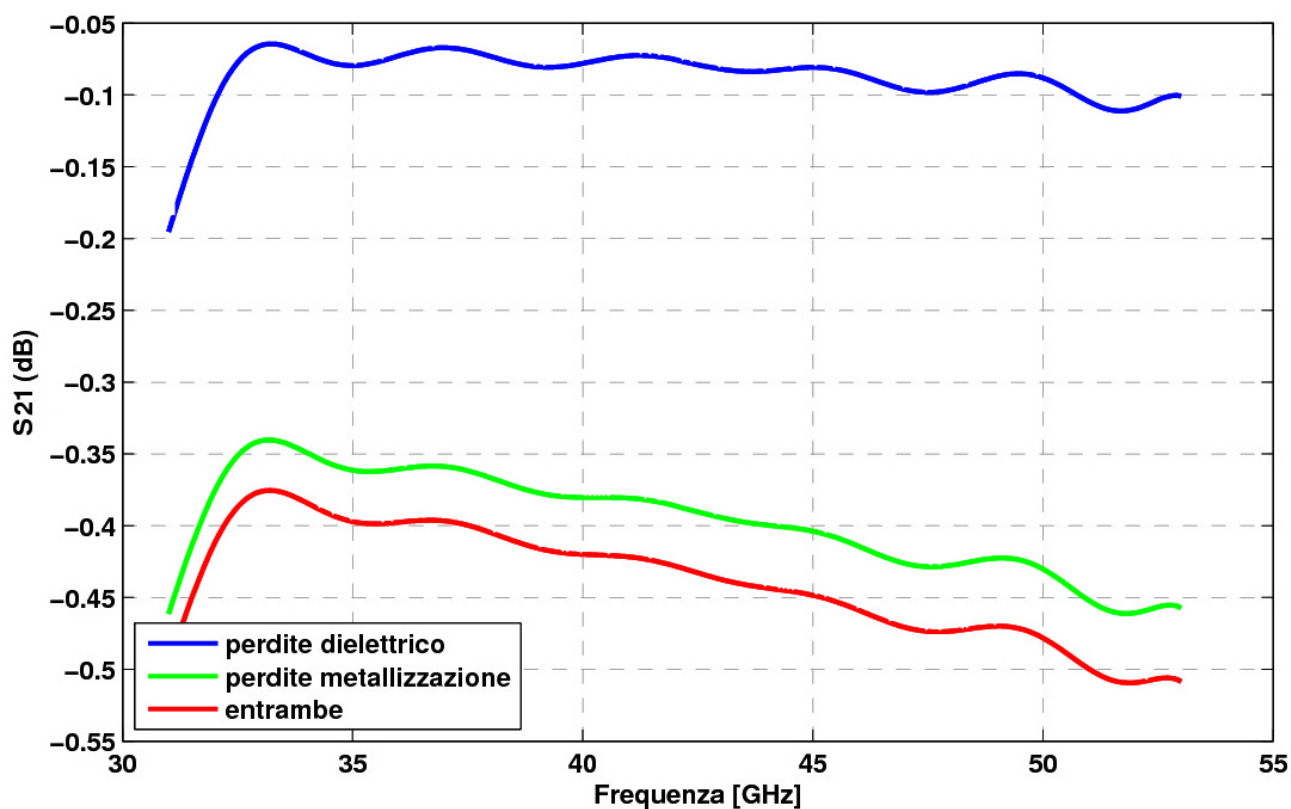


Figura 24:  $S_{21}$  in funzione delle perdite.

Anche in questo caso, analizzando la Fig. 24, si può notare che il contributo maggiore alle perdite per inserzione è dovuto in larga parte alle metallizzazioni; le perdite da inserzione risultano comunque superiori a quelle ottenute con il duroid a causa della differenza nello spessore delle metallizzazioni.

## Conclusioni

Le transizioni progettate rispettano le specifiche di progetto:

➤ **Duroid**

- *La transizione è stata analizzata tenendo conto delle specifiche della fresa da utilizzare per realizzare la metallizzazione.*
- *L'uso di fresa per la creazione del circuito a microstriscia va valutato soprattutto in relazione alla frequenza a cui deve lavorare il componente. Mentre per frequenze basse non si riscontrano grosse variazioni. Ad alte frequenze, si potrebbe avere la necessità di tecniche realizzative di maggiore precisione.*
- *La transizione tra coassiale e microstriscia ha un comportamento eccellente, di conseguenza se unita alla transizione microstriscia – guida non ne compromette il funzionamento.*

➤ **Allumina**

- *La transizione tra coassiale e microstriscia ha richiesto una rete di adattamento che non soddisfa requisiti tali da garantire, all'atto dell'unione con la transizione microstriscia – guida, la stessa efficienza ottenuta precedentemente.*
- *La saldatura del coassiale risulta molto critica, in quanto va a modificare l'impedenza in quel punto e se fatta con poca precisione incide notevolmente sulle prestazioni.*

per entrambe le transizioni

- *L' $S_{21}$  risulta inferiore ai 0.5 dB anche se non sono stati imposti dei vincoli su tale parametro.*
- *La sonda radiale ha permesso di ottenere degli ottimi risultati, in linea con le pubblicazioni analizzate, che la ponevano come componente chiave per l'efficienza del componente.*
- *La parte meccanica proposta vuole dare un'idea di come potrebbe presentarsi la transizione completa; non risulta comunque vincolante ma, forma e dimensioni dipendono principalmente da scelte progettuali, di costo e ubicazione del componente.*

## Indici delle figure e delle tabelle

Figura 1: Schema a blocchi ricevitore banda Q.....	3
Tabella 1: Elenco dei componenti e corrispettivi connettori. ....	6
Tabella 2: Elenco dei componenti e corrispettivi connettori. ....	6
Figura 2: Flangia vista in sezione e vista laterale [27].....	9
Figura 3: Da sinistra verso destra: connettore coassiale femmina [29]; esempio di dielettrico e pin in cui può essere notato il cambio di diametro a una delle estremità [30] (launch pin); vista in sezione nel punto di collegamento del connettore [31]. ....	10
Figura 4: Da sinistra a destra: flangia; possibile aspetto della transizione assemblata; vista interna del blocco con evidenziati gli scassi che ospiteranno la colla in eccesso sotto il circuito a microstriscia.....	10
Figura 5: Modello iniziale transizione .....	11
Figura 6: Vista dall'alto del circuito in microstriscia su duroid. ....	11
Figura 7: $S_{11}$ ed $S_{21}$ della transizione iniziale microstriscia-guida d'onda, duroid. ....	12
Figura 8: Dettagli curvatura e incisione del dielettrico attorno alla metallizzazione. ....	12
Figura 9: Variazione dell' $S_{11}$ al variare del raggio di curvatura. ....	12
Figura 10: Variazione dell' $S_{11}$ al variare della profondità di incisione, con raggio di curvatura fisso di 20 $\mu\text{m}$ . ....	13
Figura 11: Modello di transizione tra coassiale e microstriscia.....	13
Figura 12: $S_{11}$ ed $S_{21}$ della transizione coassiale-microstriscia.....	14
Figura 13: Modello finale della transizione .....	14
Figura 14: $S_{11}$ ed $S_{21}$ della transizione finale. ....	15
Figura 15: $S_{21}$ in funzione delle perdite. ....	15
Figura 16: Modello iniziale transizione .....	16
Figura 17: Vista dall'alto del circuito in microstriscia su allumina. ....	16
Figura 18: $S_{11}$ ed $S_{21}$ della transizione iniziale microstriscia-guida d'onda, allumina. ....	17
Figura 19: Transizione coassiale-microstriscia,.....	17
Figura 20: Rete di adattamento transizione coassiale microstriscia, allumina.....	18
Figura 21: $S_{11}$ ed $S_{21}$ della transizione coassiale-microstriscia, allumina. ....	18
Figura 22: Modello finale della transizione .....	19
Figura 23: $S_{11}$ ed $S_{21}$ della transizione finale. ....	19
Figura 24: $S_{21}$ in funzione delle perdite. ....	20

## Referenze

- [1] X. X. Ma, and R. M. Xu, "A broadband W-band E-plan waveguide-to-microstrip probe transition", 2008 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.1-4, Macau, Cina, 16-20 Dicembre 2008.
- [2] Y. Tikhov, J. W. Moon, and Y. J. Kim, "Refined characterization of E-Plane waveguide to microstrip transition for millimeter-wave applications", 2000 Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 1187-1190, Sydney, Australia, 3-6 Dicembre 2000.
- [3] B. N. Das and G. S. Sanyal, "Coaxial-to-waveguide transition", Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 123, no. 10, pp. 984-986, Ottobre 1976.
- [4] Chi-Chang Lin, Yuh-Jing Hwang, "Single-Sleeve Waveguide-to-Microstrip Transition Probe for Full Waveguide Bandwidth", 2012 42nd European Microwave Conference, pp. 1146-1149, Amsterdam, Paesi Bassi, 29 Ottobre 2012.
- [5] G. J. Wheeler, "Broadband waveguide-to-coax transitions", 1958 IRE International Convention Record, Volume 5, pp. 182-185, New York, NY, USA, 21-25 Marzo 1966.
- [6] Ke Li, Minghua Zhao, and Yong Fan, "A W Band Low-Loss Waveguide-To-Microstrip Probe Transition For Millimeter-Wave Applications", 2012 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology (MMWCST), pp. 1-3, Chengdu, Cina, 19-20 Aprile 2012.
- [7] A. Orfei, A. Cattani, A. Cremonini, L. Cresci, A. Maccaferri, S. Mariotti, R. Nesti, D. Panella, M. Poloni, J. Roda, A. Scalambra, "Elementi per la realizzazione di un multifeed per SRT nella banda 33-50 GHz", Memo Series TM-19.1, 1 Agosto 2011; 4 Marzo 2013; 3 Aprile 2013.
- [8] B. Glance, and R. Trambarulo, "A waveguide to suspended stripline transition (Letters)", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 21, issue 2, pp. 117-118, Febbraio 1973.
- [9] D. Pozar. Microwave Engineering. John Wiley & Sons; 2nd Edition edition, 1998.
- [10] Paul Wade, "Rectangular Waveguide to Coax Transition Design", W1GHZ Microwave Antenna Book, Nov/Dec 2006, pp. 10-17.  
URL [http://www.w1ghz.org/QEX/Rectangular\\_Waveguide\\_to\\_Coax\\_Transition\\_Design.pdf](http://www.w1ghz.org/QEX/Rectangular_Waveguide_to_Coax_Transition_Design.pdf).
- [11] A. R. Kerr and S. K. Pan, "Some recent developments in the design of SIS mixers.", Int. J. IR and MM Waves, Vol. 11, No. 10, pp. 1169-1187, Nov. 1990.
- [12] J. W. Kooi, G. Chattopadhyay, F. Rice, J. Zmuidzinas, S. Withington, and G. Yassin, "A Full-Height Waveguide to Thin-film Microstrip Transition", Ninth International Conference on Terahertz Electronics, University of Virginia, Oct. 15-16, 2001.
- [13] A. Navarrini, T. Pisanu, S. Mariotti, and T. Idda, "A simple k-band waveguide-to-microstrip probe transition", Microw. Opt. Technol. Lett., 49(7), pp. 1098-1107, 2007.
- [14] C. Risacher, V. Vassilev, A. Pavolotsky, and V. Belitsky, "Waveguide-to-microstrip transition with integrated bias-T", IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., vol. 13, pp. 262-264, Luglio 2003.
- [15] L. Samoska, W. R. Deal, G. Chattopadhyay, D. Pukala, A. Fung, T. Gaier, M. Soria, V. Radisic, X. B. Mei, and R. Lai, "A submillimeter-wave HEMT amplifier module with integrated waveguide



- transitions operating above 300 GHz”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 56, no. 6, pp.1380-1388, Giugno 2008.
- [16] J. W. Kooi, G. Chattopadhyay, S. Withington, F. Rice, J. Zmuidzinas, C.Walker, and G. Yassin, “A full-height waveguide to thin-film microstrip transition with exceptional RF bandwidth and coupling efficiency”, Int. J. IR MM Waves, vol. 24, no. 3, pp. 261–284, 2003.
- [17] G. Yassin and S. Withington, “Analytical expression for the input impedance of a microstrip probe in waveguide”, Int. J. Infrared Millimeter Waves, vol. 17, no. 10, 1996.
- [18] S. Withington, G. Yassin, J. Leech, and K. G. Isaak, “An accurate expression for the input impedance of one-sided microstrip probes in waveguide”, Tenth International Symposium on Space Terahertz Technology, Charlottesville, Marzo 1999.
- [19] Y. Lou, C. H. Chan, and Q. Xue, “An in-line waveguide-to-microstrip transition using radial-shaped probe”, 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 18, no. 5, pp. 3117–3120, Honolulu, Hawaii, 9-15 Giugno 2007. A. R. Kerr and S. K Pan, “Some recent developments in the design of SIS mixers,”, Int. J. IR and MM Waves, Vol. 11, No. 10, pp. 1169-1187, Nov.1990.
- [20] URL <http://nora.ing.unibs.it/riservato/propaga/materiale/proguirwcw.pdf> .
- [21] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, Inc., 2001.
- [22] Tong C-Y. E., Blundell R, Paine S, “Design and characterization of a 250- 350-GHz fixed-tuned superconductor-insulator-superconductor receiver”, IEEE, Microwave Theory and Techniques, Vol MTT-44, pp. 1548-1556, Settembre 1996.
- [23] Y.-C. Leong and S.Weinreb, “Full-band waveguide-to-microstrip probe transitions,” IEEE MTT-S Dig., Giugno 1999.
- [24] URL <http://mpd.southwestmicrowave.com/> .
- [25]URL <http://mpd.southwestmicrowave.com/products/product.php?need=launchAccess&item=34> consultato in data 17/03/2014.
- [26] URL <http://www.millitech.com/> .
- [27] URL <http://www.millitech.com/pdfs/rddim.pdf> consultato in data 07/12/2014.
- [28] URL <http://mpd.southwestmicrowave.com/showImage.php?image=753&name=1414-05SF.pdf> .
- [29]URL <http://mpd.southwestmicrowave.com/products/family.php?family=119> consultato in data 07/12/2014.
- [30]URL <http://mpd.southwestmicrowave.com/products/family.php?family=125> consultato in data 07/12/2014.
- [31] URL <http://mpd.southwestmicrowave.com/products/family.php?family=120> consultato in data 07/12/2014.
- [32] URL <http://www.autodesk.it/products/inventor/overview> .

[33] URL <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Signal+Integrity/ANSYS+HFSS> .

[34] URL <http://it.mathworks.com/products/matlab/> .