INAF ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA NATIONAL INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

UIT-2006

TITLE: **Ingegnerizzazione di un Array Planare di nuova concezione per applicazioni satellitari**

DOC. TYPE: **INTERNAL REPORT** **IASF-Bo 515**

PROJECT REF.: **Planar Array 2006** **Pag V,73**

ISSUE/REV.: **1.0** **DATE: Febbraio 2008**

Prepared by	**F. Cuttaia** **V. Martorelli** **A. De Rosa**	**Date:**	**February 2008**

DISTRIBUTION LIST

Recipient	Company / Institute	E-mail address	Sent
UFFICIO UIT	INAF/IASF – Bologna	sortino@iasfbo.inaf.it	Yes
N. MANDOLESI	INAF/IASF – Bologna	mandolesi@iasfbo.inaf.it	Yes
F. CUTTAIA	INAF/IASF – Bologna	cuttaia@iasfbo.inaf.it	Yes
V. MARTORELLI	INAF/IASF - Bologna	martorelli@iasfbo.inaf.it	Yes
A. DE ROSA	INAF/IASF - Bologna	derosa@iasfbo.inaf.it	Yes

CHANGE RECORD

Issue	Date	Sheet	Description of Change	Release
0.1	October	All	Draft: design dei subarray e risultati delle prime misure	Draft
1.0	febbraio	All	Inseriti risultati delel prove elettriche ed elettromagnetiche su planar array di 256 elementi	

TABLE OF CONTENTS

1 DOCUMENTI APPLICABILI ..... - 0 -

2 INTRODUZIONE ..... - 1 -

2.1 SCOPO ..... - 1 -
2.2 RISULTATI ..... - 1 -
2.3 DELIVERABLES ..... - 2 -
2.4 PARTNER AZIENDALI ..... - 3 -
2.5 FACILITIES ..... - 4 -
2.6 PERSONALE COINVOLTO ..... - 4 -
2.7 RINGRAZIAMENTI ..... - 5 -

3 DESCRIZIONE ..... - 6 -

3.1 BACKGROUND ..... - 6 -
3.2 PROBLEMATICHE LASCIATE IRRISOLTE DAL BANDO 2005 ..... - 6 -
3.3 BANDO 2006: PROJECT FLOW ..... - 7 -

4 FASE PRELIMINARE : IMPLEMENTAZIONE DEL SUB – ARRAY. MODELLISTICA ..... - 8 -

4.1 INTRODUZIONE ..... - 8 -
4.2 ALIMENTAZIONE ..... - 8 -
4.2.1 Waveguide ..... - 8 -
4.2.2 Microstriscia ..... - 9 -
4.3 SUBARRAY ..... - 11 -
4.3.1 2-elementi ..... - 11 -
4.3.2 4-elementi ..... - 13 -

5 FASE PRELIMINARE : REALIZZAZIONE HARDWARE DEI SUB-ARRAY ..... - 16 -

5.1 INTRODUZIONE ..... - 16 -
5.2 TECNICHE REALIZZATIVE ..... - 16 -
5.2.1 Sputtering ..... - 16 -
5.2.2 Rapid Prototyping ..... - 17 -
5.2.3 Lavorazioni di macchina ..... - 18 -
5.3 REALIZZAZIONI HARDWARE PER SUBARRAY ..... - 19 -
5.3.1 Subarray in guida d'onda ..... - 19 -
5.3.2 Subarray in MS ..... - 21 -
5.3.3 Alimentazione di subarray in microstriscia ..... - 21 -
5.4 PROBLEMATICHE INCONTRATE LEGATE AL PROCESSO PRODUTTIVO DEI CAMPIONI ..... - 21 -
5.4.1 Verniciatura ..... - 22 -
5.4.2 Loss – conducibilità elettrica ..... - 23 -
5.4.3 Scarsa adesione/ tenuta meccanica ..... - 24 -
5.5 PROBLEMATICHE INCONTRATE LEGATE AL PROCESSO PRODUTTIVO DELLA RETE DI ALIMENTAZIONE ..... - 25 -

6 FASE PRELIMINARE : MISURE DI SUBARRAY ..... - 26 -

6.1 ALIMENTAZIONE IN GUIDA D'ONDA ..... - 26 -
6.1.1 Trasformatori in cascata ..... - 27 -
6.2 ALIMENTAZIONE IN MICROSTRISCIA ..... - 27 -
6.3 SUBARRAY IN GUIDA D'ONDA ..... - 28 -
6.3.1 Conducibilità elettrica ..... - 28 -
6.3.2 Caratterizzazione a banco ..... - 28 -
6.3.3 Caratterizzazione in camera anecoica ..... - 30 -
6.4 SUBARRAY IN MS ..... - 31 -

6.4.1 Conducibilità elettrica ..... *- 31 -*
6.4.2 Caratterizzazione a banco ..... *- 31 -*
6.4.3 Caratterizzazione in camera anecoica ..... *- 33 -*
6.4.4 Confronto col modello ..... *- 37 -*
6.4.4.1 Piano H ..... - 37 -
6.4.4.2 Piano E ..... - 38 -
6.5 LA 'RICETTA' E LA SCELTA DEL MODELLO 'STANDARD' PER L'ARRAY ..... - 39 -

7 FASE FINALE : L' ARRAY DI 256 ELEMENTI ..... - 40 -

7.1 LA RETE ..... - 40 -
7.1.1 Il modello elettrico ..... *- 40 -*
7.1.2 L' Hardware ..... *- 40 -*
7.2 LA MATRICE RADIANTE ..... - 41 -
7.2.1 Disegno elettromagnetico ..... *- 41 -*
7.2.2 Disegno meccanico ..... *- 41 -*
7.2.3 Scelta dei materiali ..... *- 41 -*
7.3 ANTENNE DIELETTRICHE ..... - 42 -
7.4 SPUTTERING ..... - 42 -
7.4.1 Verniciatura ..... *- 42 -*
7.4.2 Metallizzazione ..... *- 43 -*
7.5 MONTAGGIO FINALE ..... - 45 -

8 CARATTERIZZAZIONE ARRAY ..... - 48 -

8.1 CONDUCIBILITÀ ELETTRICA ..... - 48 -
8.2 MISURE A BANCO ..... - 48 -
8.3 MISURE DI EMISSIONE IN CAMERA ANECOICA ..... - 50 -
8.4 CONFRONTO COL MODELLO ..... - 53 -

9 ANALISI DEL RISULTATO & OPEN ISSUES ..... - 57 -

10 APPENDICE 1 : DISEGNI MECCANICI ..... - 59 -

10.1 SUB-ARRAY 2 ELEMENTI CON ALIMENTAZIONE IN GUIDA D'ONDA ..... - 59 -
10.2 SUB-ARRAY 4 ELEMENTI CON ALIMENTAZIONE IN MICROSTRISCIA ..... - 62 -
10.3 ARRAY COMPLETO ..... - 64 -

11 APPENDICE 2: RAPPORTO DI TEST PRELIMINARE SU PARTI A1 E B1 SOTTOPOSTE A SPUTTERING (30-10-2007) ..... - 66 -

11.1 ISPEZIONE VISIVA : ..... - 66 -
11.1.1 Pezzi non sottoposti a verniciatura : ..... *- 66 -*
11.1.2 Pezzi sottoposti a trattamento di verniciatura aggrappante: ..... *- 68 -*
11.2 MISURA DI RESISTENZA : ..... - 71 -
11.3 ISPEZIONE AL MICROSCOPIO ELETTRONICO : ..... - 74 -
11.4 COMMENTI: ..... - 74 -

1 DOCUMENTI APPLICABILI

[[AD1] *Progetto UIT 2005: Sviluppo di un Array Planare di Elementi Radianti per Applicazioni Satellitari* , Cuttaia 2006, IASF Internal report 509/2008

[AD2] *Analisi di un slotted waveguide a singolo profilo come rete di alimentazione per il planar array*, Martorelli 2008, IASF Internal report 510/2008

[AD3] *Progetto di un lanciatore di modo TE11 in microstriscia*, Martorelli 2007, IASF Internal report 511/2008

[AD4] *Analisi accoppiamento tra microstriscia e stub right bend*, Martorelli 2008, IASF Internal report 512/2008

[AD5] *Considerazioni sull'effetto passa-basso della transizione SMA-microstriscia*, Martorelli 2008, IASF Internal report 513/2008

[AD6] *On the perpendicular coax-microstrip transition*, Vratislav Sokol, Karel Hoffmann, Premysl Hudec,Czech Technical University,

[AD7] *Disegno di una rete in microstriscia per un array di 16x16 elementi*, Martorelli 2008, IASF Internal Report 514/2008

2 INTRODUZIONE

Il lavoro descritto si inquadra tra i progetti finanziati nell'ambito del Bando UIT 2006. Esso si propone come naturale conseguenza del progetto finanziato nel Bando UIT 2005 , avente come oggetto ' realizzazione ******' .

2.1 Scopo

Il progetto è finalizzato alla realizzazione di un array costituito da un numero considerevole di antenne dielettriche, a partire dal disegno radiometrico dei sub-array sviluppato nel Bando 2005. Il risultato finale deve essere un sistema pre-ingegnerizzato, nel quale le soluzioni tecniche esplorate consentano di abbattere i costi di produzione e indicare una strada percorribile nella produzione di un prodotto eventualmente commercializzabile. Infatti lo sviluppo dei sub-array nel Bando 2005, tralasciando pure l'aspetto performance e i problemi tecnici che lasciava insoluti riguardanti la combinazione di un numero considerevole di elementi, era stato di tipo puramente prototipale: il disegno radiometrico e meccanico, date le soluzioni impiegate (come l'elettroformatura e le realizzazioni meccaniche in metallo) , era intrinsecamente dispendioso e non lasciava spazio a una possibile produzione seriale.

2.2 Risultati

Pur facendo salvo il disegno concettuale della parte radiativa (antenne dielettriche e design del piano ground) dei subarray del Bando 2005, sono state esplorate qui nuove possibilità realizzative che facciano uso di soli materiali plastici, in vista di una loro possibile realizzazione seriale tramite processi di stampaggio industriale, le cui proprietà conduttive sono garantite da un processo di metallizzazione; il disegno del lanciatore, realizzato per elettroformatura, è stato sostituito da elementi radianti in microstriscia in grado di eccitare direttamente le antenne dielettriche. Un secondo disegno è stato considerato, facente solo uso di elementi in guida d'onda, ma a causa delle problematiche incontrate nella combinazione tra i vari elementi di array, e a causa del tempo limitato del progetto, non è stato esteso all'array completo.

Il progetto 2006 ha avuto come output il modello radiometrico la realizzazione pre-ingegneristica e la caratterizzazione elettrica di un array di 256 elementi radianti in solo materiale dielettrico con circuito di alimentazione in microstriscia: peculiarità del sistema, oltre al disegno RF innovativo, è la sua intera realizzazione in

materiali plastici usando solo tecniche di metallizzazione su plastiche (sputtering), per sostituire le parti realizzate in metallo nel Bando 2005.
Il sistema così realizzato è funzionante e i risultati sono in linea con la modellistica.
Il sistema così concepito può consentire di abbattere fortemente i costi produttivi nel caso in cui si decida di portare avanti il progetto in vista di una possibile produzione seriale.

2.3 Deliverables

Al termine del progetto sono stati prodotti svariati deliverable, sia in termini di hardware che studi documentati in report specifici.
Segue un elenco dei principali:

HARDWARE:

- rete di alimentazione per subarray in microstriscia, circuiti in serie e in parallelo
- Subarray 2X2 , in materiali resina e in materiale Derlin, con alimentazione in microstrsicia
- subarray 2X1 , in materiali ottone, resina e Derlin, con alimentazione in waveguide
- Trasformatori da WR75 a SRW realizzati in ottone, resina e Derlin.

L'insieme dei deliverable che seguono costituisce il deliverable ARRAY oggetto di questo bando:

- Circuito rete di alimentazione per array di 256 elementi
- 256 Antenne Goodundo
- Gusci superiore e inferiore dell'array

DOCUMENTAZIONE:

Progetto UIT 2005: Sviluppo di un Array Planare di Elementi Radianti per Applicazioni Satellitari , Cuttaia 2006, IASF Internal report 509/2008

Analisi di un slotted waveguide a singolo profilo come rete di alimentazione per il planar array, Martorelli 2008, IASF Internal report 510/2008

Progetto di un lanciatore di modo TE11 in microstriscia, Martorelli 2007, IASF Internal report 511/2008

Analisi accoppiamento tra microstriscia e stub right bend, Martorelli 2008, IASF Internal report 512/2008

Considerazioni sull'effetto passa-basso della transizione SMA-microstriscia, Martorelli 2008, IASF Internal report 513/2008

Disegno di una rete in microstriscia per un array di 16x16 elementi, Martorelli 2008, IASF Internal report 514/2008

RELAZIONE FINALE (questo documento)

2.4 Partner aziendali

Il naturale partner aziendale contrattuale di riferimento è stato lo stesso del Bando 2005, cioè Officine Pasquali, coi quali è in essere una produttiva e seria collaborazione da parecchi anni. In concertazione con loro è stato sviluppato il progetto e si sono individuate di volta in volta le soluzioni più idonee per i suoi vari aspetti. Il prodotto finale è sicuramente il frutto di un lavoro congiunto sempre collaborativo e ispirato alla cura delle performance e dei dettagli.
In tutti gli altri casi in cui si sono rese necessarie lavorazioni presso soggetti esterni, Officine Pasquali si è posto come intermediario per i contrattori terzi.
Tra questi, è degno di nota il ruolo svolto da Sputtering S.r.l. (Bellusco, Mi), società neonata nel campo dello sputtering, con la quale sono stati approntati e raffinati i processi di metallizzazione per le finalità e i requisiti del progetto, che esulano dalle caratteristiche 'standard' del processo , avente normalmente finalità puramente estetiche (cromature, ramature etc.): meritevole la loro disponibilità a perfezionare attraverso una serie di test la 'ricetta' per incontrare le nostre richieste
Degna di ulteriore menzione è la ditta TOPP S.r.l. (Sandrigo, Vi) alla quale sono state commissionate le lavorazioni in rapid prototyping per la realizzazione dei sub-array necessari per mettere a punto il processo di sputtering e della maschera necessaria per la corretta realizzazione dello stesso: la loro risposta è sempre stata tempestiva e all'altezza delle richieste.
Il partner diretto nella campagna di misura è stato R.T.W. (Navacchio, Pisa) , col quale si è instaurato un rapporto di grande disponibilità, anche in tutti i quei casi in cui le esigenze dei test hanno imposto improvvise accelerazioni alla schedala o l'esecuzione di misure dapprima non previste.
Per la realizzazione dei circuiti in Microstriscia ci si è avvalsi di due differenti aziende, a seconda del bisogno specifico:
la ICS di Modena per i circuiti in microstriscia dei sub-array
la Nuova Eurotar (Tivoli, Rm) per il circuito di alimentazione dell'array di 256 antenne.
Segue la corretta denominazione, corredata dei riferimenti utili, delle ditte sopra citate.

Officine Pasquali – Firenze, Via palazzo dei Diavoli 124 Firenze www.officinepasquali.it
RTW Ride The Wave srl - - Via A. Bassi, 5 - 56121 Ospedaletto Pisa, www.rtw.it
Sputtering S.r.l , Via dell Industria 57 , Bellusco (Mi) www.sputtering.com
TOPP S.p.A., Via Galvani, 59 36066 - Sandrigo z.i. (VI) www.rp.topp.it
KOLZER via Francia, 4 - 20093 Cologno Monzese (MI) Italy http://www.kolzer.it
Nuova EUROTAR, Tivoli, (Rm), www.nuova-eurotar.it
ICS , via dei Tornitori 41- 49, 41100 Modena, www.icsmodena.it

2.5 Facilities

Le facilities utilizzate sono state :
l'officina meccanica di Officine Pasquali per la realizzazione, con macchine a controllo numerico, dei pezzi meccanici (supporto array e antenne dielettriche);
I laboratori di RTW e la camera anecoica ad essa in uso presso il Polo tecnologico di Navacchio, per le misure elettriche in radio frequenza.
Il laboratorio di Sputtering S.r. per l'uso della macchina adibita allo sputtering e per il perfezionamento delle opportune maschere di copertura.
Il laboratorio a microonde dell' Istituto di Radio Astronomia per alcune misure preliminari sui circuiti di alimentazione in microstriscia.

2.6 Personale coinvolto

Segue un elenco delle persone coinvolte nel progetto in modo continuativo:
.

Francesco Cuttaia	IASF – Bologna	Coordinatore progetto e misure RF
Valerio Martorelli	IASF – Bologna	ingegnere progettista elettromagnetico e misure RF
Adriano De Rosa	IASF – Bologna	Ingegnere meccanico
Matteo Biggi	Officine Pasquali Firenze	Ingegnere progettista partner aziendale
Luigi Volpi	RTW Pisa	Ingegnere Elettromagnetico, misure RF partner aziendale

2.7 Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento alla ditta Kolzer S.r.l, produttrice delle macchine per la realizzazione dello sputtering, che ci ha inizialmente indirizzati nella scelta dell'azienda di riferimento per il processo da attuarsi, ponendosi come tramite tra IASF e Sputtering S.r.l .

Si ringraziano Alberto Brighenti, Giordano Orsi e Paolo Cazzola, in organico all' IASF – Bologna, per la dedizione alla 'causa' mostrata realizzando con competenza le saldature dei connettori necessarie a soddisfare tutti i nostri possibili desideri in tema di caratterizzazione delle reti in microstriscia.

Si ringrazia Sergio Mariotti, in organico all'Istituto di Radioastronomia IRA di Bologna, per la disponibilità mostrata ogni qual volta si sia reso necessario effettuare in tempi rapidi delle misure a banco o anche semplicemente per i suggerimenti e consigli rivelatisi sempre preziosi.

Si ringrazia la dr. Francesca Sortino (Ufficio Innovazione Tecnologica) per la collaborazione prestata in varie fasi dello sviluppo del progetto.

3 DESCRIZIONE

3.1 Background

Il progetto 2006 trova il suo naturale Background nel progetto afferente al Bando 2005 , in cui si era realizzato un elemento di sub-array con elementi radianti in materiale dielettrico. L'output del progetto era costituito da una matrice di 2X2 elementi radianti , alimentati con due differenti tipologie di lanciatori, in elettroformatura o lavorati di macchina (rif **)

3.2 Problematiche lasciate irrisolte dal Bando 2005

Durante il Bando 2005 sono state sviluppate con successo le antenne dielettriche e i lanciatori per le stesse. Tuttavia il processo realizzativo richiedeva una enorme customizzazione del prodotto, attraverso l'elettroformatura dei lanciatori e la rifinitura da parte dell'operatore. Essendo tutta la struttura portante realizzata in metallo, escludeva la possibilità di uno stampaggio o comunque di una lavorazione di tipo seriale, nel caso di un approdo del progetto a una fase commerciale: questo comportava costi di produzione molto elevati , tali da non poter nemmeno ipotizzare una possibile commercializzazione di un prodotto ingegnerizzato a partire da quelle soluzioni tecnologiche. Sotto il profilo delle performance, le perdite legate alla transizione tra il circuito di alimentazione e il lanciatore hanno richiesto un ripensamento globale del circuito stesso.

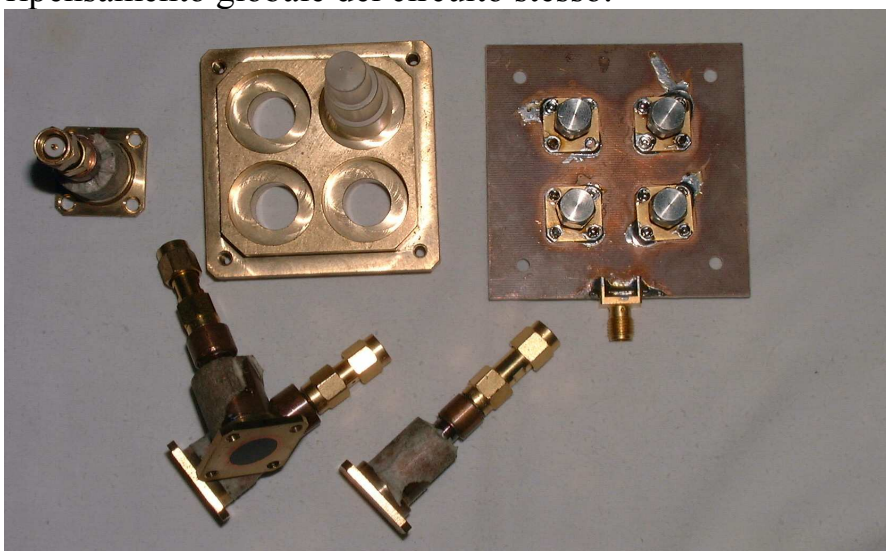


Figura 1 parti costituenti il subarray del bando 2005: in evidenza I quattro lanciatori assiali in cui è visibile il ripieno in rexolite, la matrcice radiante di 4 elementi, una antenna in rexolite, il circuito di alimentazione a 4 connettori

3.3 Bando 2006: Project flow

Per risolvere i problemi di cui al punto precedente si è pensato di esplorare soluzioni alternative che impiegassero puramente materiali plastici, in vista di una possibile produzione seriale a mezzo stampa o altro. Questo ha reso necessario esplorare tecniche di metallizzazione che fossero in grado di garantire caratteristiche elettriche confrontabili con quelle di un oggetto realizzato in metallo. Si è inoltre deciso di abbandonare la strada del lanciatore assiale del bando precedente in favore di un circuito in microstriscia con patch radianti in grado di eccitare direttamente le antenne dielettriche in contatto con esso. Il problema di realizzare diversi pezzi 'spare' in breve tempo e a basso costo, per poter effettuare più test sul design RF e contemporaneamente.

4 Fase preliminare : implementazione del sub – array. Modellistica

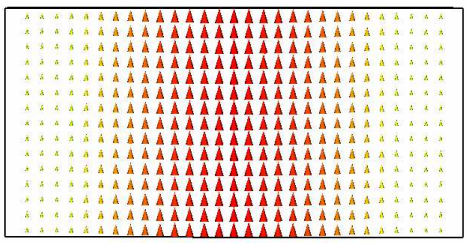
4.1 Introduzione

Il disegno RF da impiegarsi per la realizzazione dell' Array di 256 elementi è stato dapprima testato su sub-array di 2X2 elementi. Sono stati seguiti in questa fase iniziale due percorsi paralleli, che hanno portato allo sviluppo di prodotti molto differenti per caratteristiche. Infatti, pur tenendo invariati, rispetto al Bando 2005, il design degli elementi dielettrici e del choke, si è ripensata interamente l'alimentazione. I due diversi design esplorati si basano rispettivamente su:
alimentazione in guida d'onda ridged con slots periodici che si affacciano sulle antenne dielettriche
alimentazione in microstriscia con patch in grado di eccitare le antenne dielettriche a contatto con esse.
I due differenti schemi circuitali sono descritti sinteticamente nei paragrafi seguenti e trattati estesamente nei documenti in referenza.

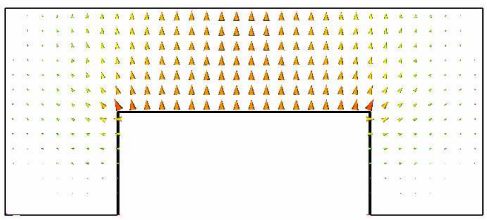
4.2 Alimentazione

4.2.1 Waveguide

La single ridged waveguide (srw) è un particolare tipo di guida d'onda ottenuta sagomando opportunamente il lato lungo di una guida rettangolare. In generale una srw presenta una banda che maggiore di 2:1 e a parità di frequenza di cut-off ha dimensioni minori di una guida rettangolare standard.

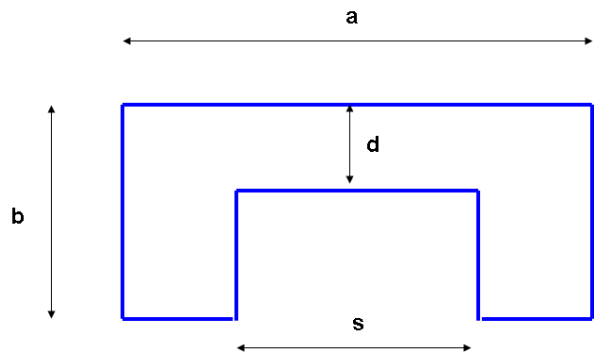


a)



b)

Figura 2: Sezione trasversale e rappresentazione vettoriale del modo fondamentale di una WR75 (figura a) e della srw (figura b) utilizzata nel progetto



a	13.2 mm
B	6 mm
s	7 mm
d	3 mm

Le guide profilate rappresentano un'alternativa valida per realizzare array planari. Esse infatti permettono di avere un'alimentazione in guida integrabile con il supporto stesso delle antenne goodundo. Il principio di funzionamento è lo stesso previsto per gli array in guida fessurata: fessure longitudinali realizzate sul lato lungo della guida prelevano il campo in guida irradiando come se fossero dipoli. Caratteristiche progettuali sono:

- lunghezza delle slot pari a $\lambda_0/2$
- distanza tra le slot pari a $\lambda_g/2$
- slot adiacenti alternate rispetto all'asse di mezzeria
- guida terminata da uno short distante $\lambda_g/4$ dal centro dell'ultima slot.

Un'array del genere è denominato risonante in quanto l'onda stazionaria che si crea al suo interno viene assorbita e irradiata in fase. Per una descrizione dettagliata si faccia riferimento all'apposito rapporto.

4.2.2 Microstriscia

La seconda alimentazione prevista per il planar array è stata progettata in microstriscia utilizzando un patch come eccitatore di modo. La microstriscia è una rete d'alimentazione molto versatile con la quale è possibile alimentare strutture molto complesse tramite circuiti stampati. La sua versatilità permette di avere guide con qualunque valore di impedenza variando la larghezza della traccia metallica.

Il lanciatore progettato (chiamato L12-b) è stato realizzato lavorando le due facce metalliche di un PCB. Su un lato è prevista la rete vera e propria costituita da un circuito stampato, da stub per accoppiare magneticamente le due facce e da una corona di stubs piegati ad angolo retto ed utilizzati per confinare il campo.

Qust'ultimi stubs sono lunghi $\lambda_g/4$ e si comportano come cortocircuiti virtuale tra le due facce. Per occupare meno spazio gli stubs sono stati piegati ad angolo retto.
La faccia superiore del PCB rappresenta il piano di massa. Su di esso è stato ricavato un cerchio di diametro pari a quello delle antenne goodundo dove esse verranno poggiate. All'interno del cerchio è presente un patch metallico non centrato che si accoppia magneticamente con la rete sottostante ed ha il compito di trasferire l'energia dell'onda quasi-TEM della microstriscia al modo TE11 della guida dielettrica.
Per evitare radiazione in direzioni non desiderate (la microstriscia è comunque una struttura aperta) è stato poggiato sulla corona un cilindro vuoto e chiuso all'estremità di diametro pari a quello di una guida caricata in dielettrico (bicchiere). Tale bicchiere ha una lunghezza di cut-off più bassa di quella in gioco fungendo così da carico ad alta impedenza. La radiazione, non potendo scorrere all'interno del cilindro, verrà reindirizzata verso le antenne dielettriche. Per una trattazione più dettagliata si rimanda all'apposita documentazione.

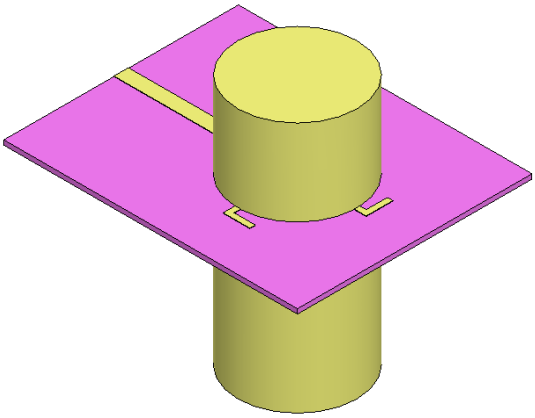


Figura 3: Immagine del L12-b visto dalla parte inferiore. Si nota la linea di alimentazione, gli stub ad angolo retto e la cavità ad alta impedenza

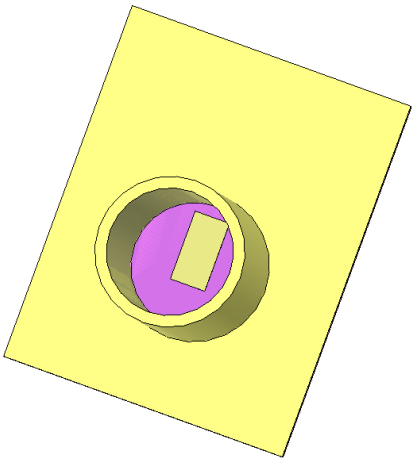


Figura 4: Immagine del L12-b visto dall'alto. Si nota il patch e la guida rappresentante il goodundo (la rexolite è in trasparenza)

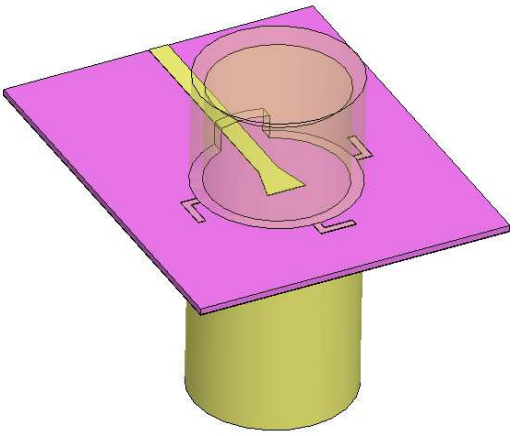


Figura 5: Altra immagine vista da sotto, con cavità in trasparenza. In questo caso si nota lo stub sagomato

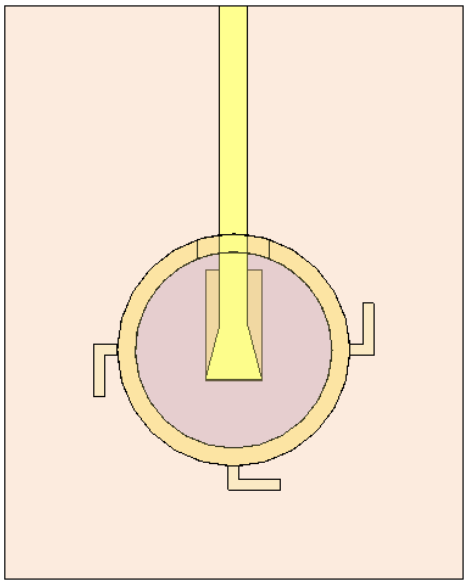


Figura 6: Sezione orizzontale del L12-b con supporto in trasparenza. Si nota l'allineamento tra patch e stub e la corona di stub ad angolo retto.

4.3 Subarray

Il design degli elementi di sub-array è stato naturalmente condizionato dal tipo di alimentazione adottato. Per il sistema in guida d'onda si è scelto uno schema asimmetrico a due soli elementi , che potrà eventualmente essere simmetrizzato quando accoppiato ad altri elementi, nel caso in cui si decidesse di esplorare ulteriormente questa soluzione. Per il subarray alimentato in miscorstriscia si è invece adottato lo schema a 4 elementi già usato nel Bando 2005.

4.3.1 2-elementi

La spaziatura degli elementi radianti nasce dal compromesso di combinare insieme le proprietà radiative dell'elemento (determinate, a parità di disegno del singolo elemento radiante dielettrico e del choke, dalla spaziatura delle antenne) e le proprietà emissive della guida d'onda provvista di slot.
Il design finale è riportato nella figura a seguire e dettagliato in tavola in Appendice.

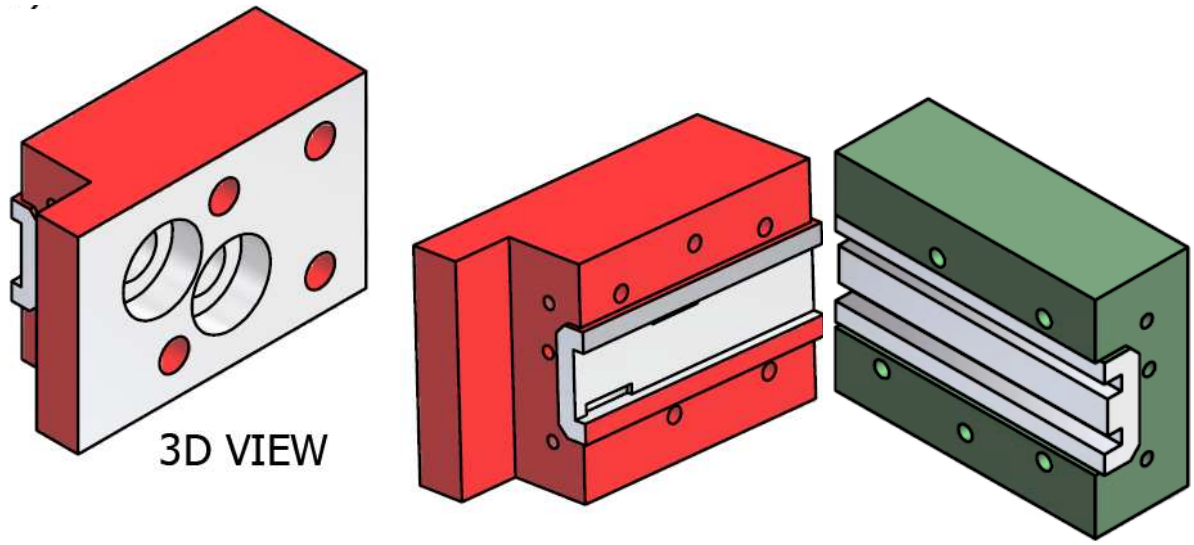


Figura 7 Sub-array in guida d'onda slotted

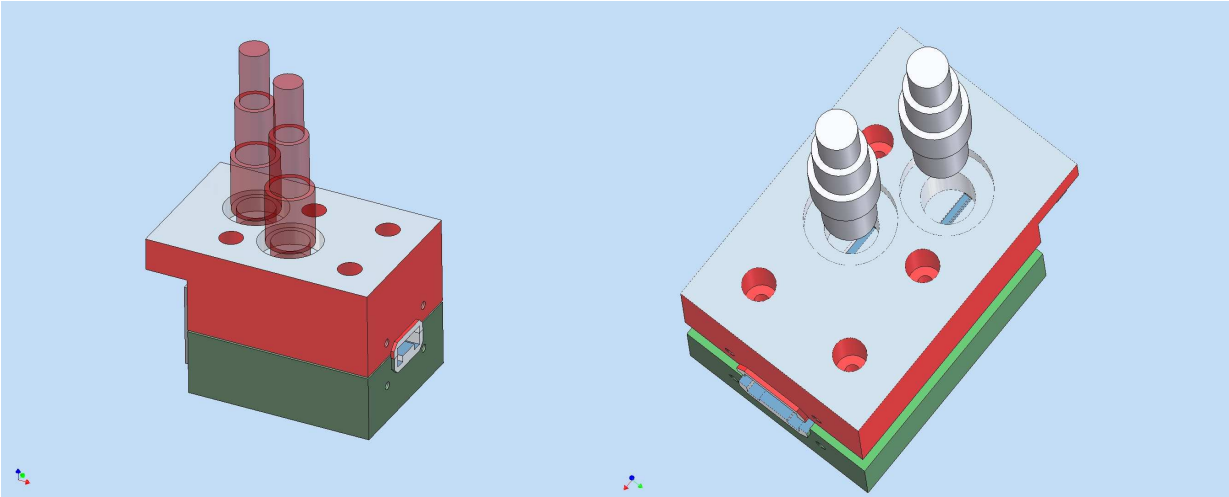


Figura 8

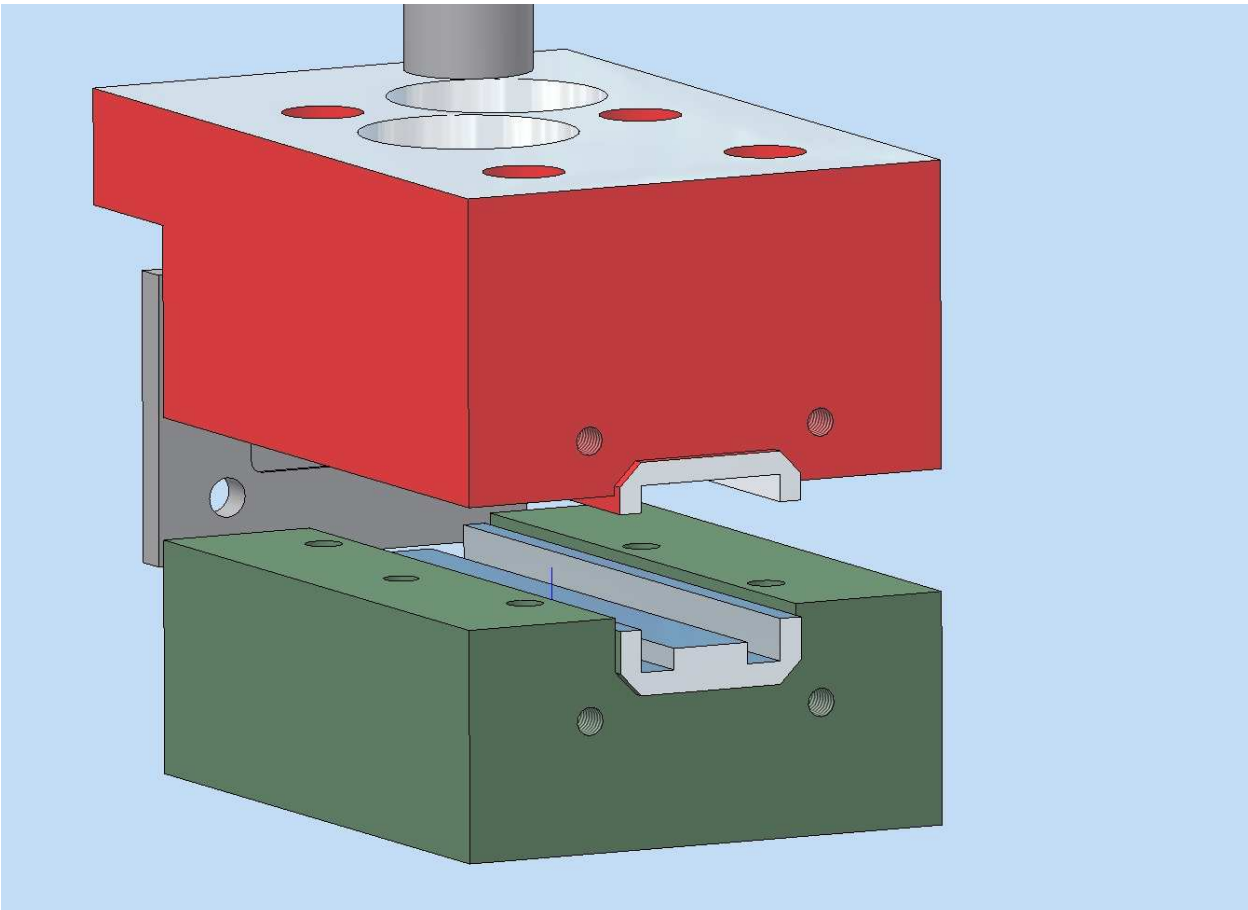


Figura 9

4.3.2 4-elementi

Il design di questo subarray è più conservativo rispetto al progetto del bando precedente, almeno per ciò che riguarda la parte superiore dove alloggiano le antenne dielettriche. La dimensione della cava è stata lievemente allungata per ottimizzare il design. Il disegno è comunque concettualmente molto differente in termini di funzionamento, dato che l' eccitazione non viene qui più trasmessa attraverso singoli lanciatori in guida d'onda ma tramite patches ricavate nel circuito di alimentazione in microstriscia.
E' importante il buon contatto elettrico tra la base dell'antenna dielettrica e la patch, così come la buona conducibilità dalla cava e dei bicchieri posti nel semiguscio inferiore. I collarini che contornano i bicchieri presentano inoltre degli scarichi che evitano qualunque contatto elettrico tra l'alimentazione e i bicchieri, se non nelle zone volute (quali le alette, vedi §4.2.2).
La geometria del subarray è rappresentata nel disegno 3-D a seguire, le tavole dettagliate sono invece riportate in Appendice (§10.2).

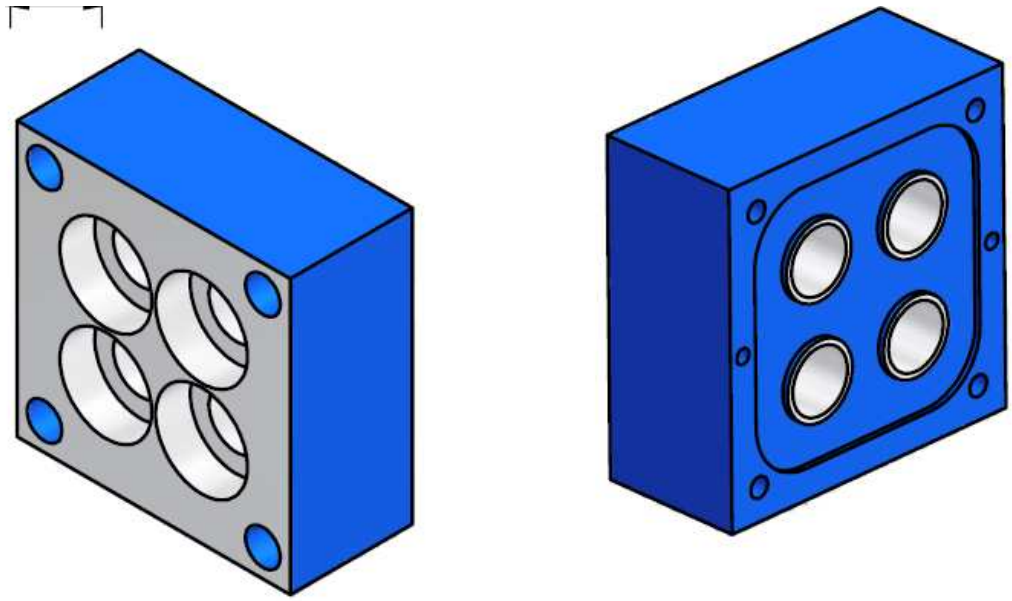


Figura 10 parte superiore: nel pannello sinistro il ground plane e I choke che alloggiano le antenne dielettriche. Nel pannello destro vista dal basso: sono evidenziati i collarini metallizzati a contatto col piano di massa del circuito di alimentazione.

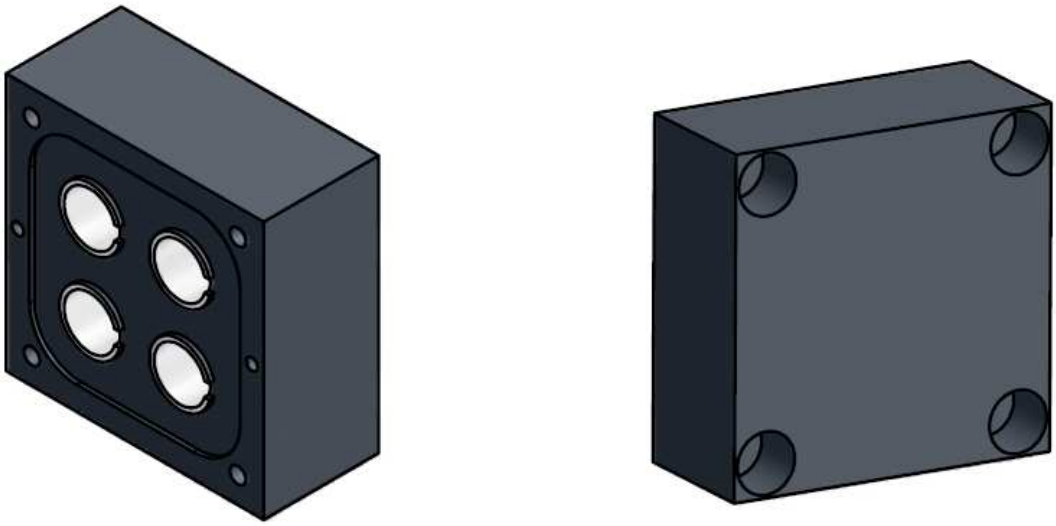


Figura 11 semiguscio inferiore: in evidenza nel pannello sinistro I bicchieri metallizzati con gli scarichi per consentire il passaggio della microstriscia evitando il contatto elettrico.

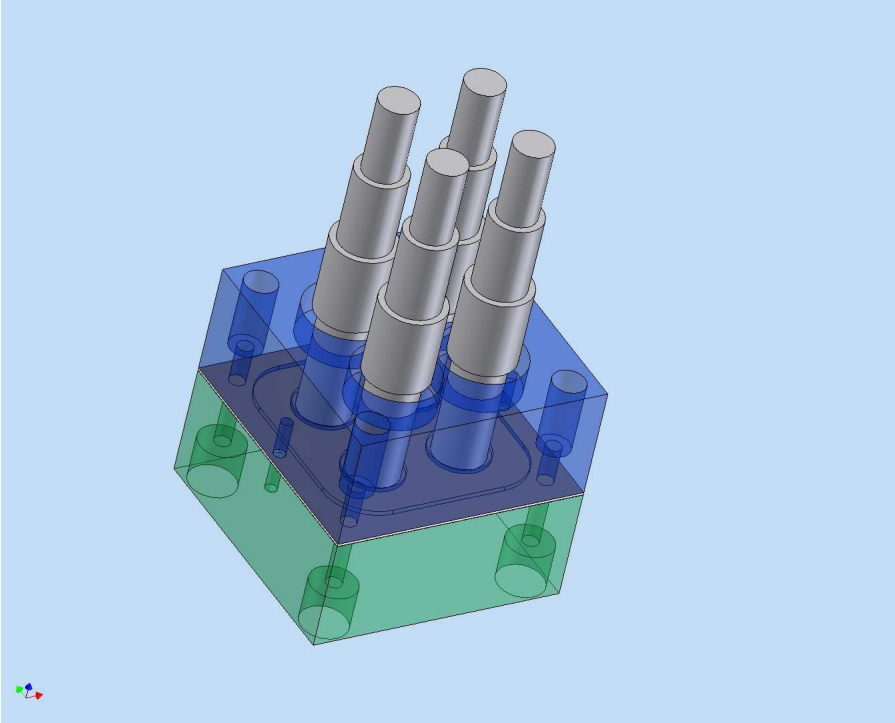


Figura 12

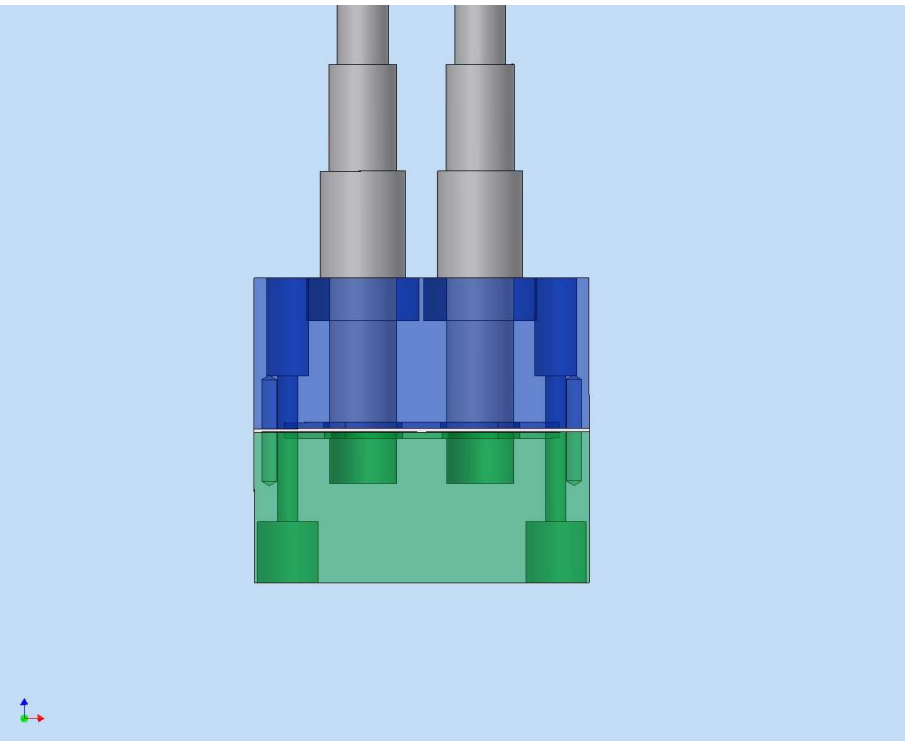


Figura 13

5 Fase preliminare : realizzazione Hardware dei sub-array

5.1 Introduzione

Il design RF è andato di pari passo con lo studio delle possibili soluzioni realizzative atte a impiegare esclusivamente materiali plastici e processi di metallizzazione che garantissero adeguate caratteristiche di conducibilità elettrica.
Si è deciso dunque di procedere su due filoni:
Studio di eventuali processi di realizzazione meccanica alternativi alla lavorazione di macchina.
Studio dei possibili processi di metallizzazione.
Le analisi di cui sopra hanno portato a selezionare due possibili processi:
il rapid prototyping per la realizzazione veloce ed economica di campioni da sottoporre a metallizzazione.
lo sputtering con target metallico per assicurare le caratteristiche elettriche.
Di fianco al processo di rapid prototyping non si è comunque abbandonata la strada della realizzazione a mezzo macchina a controllo numerico , in grado di garantire accuratezza di lavorazione più elevata ed essendo il prodotto rappresentativo di un eventuale processo seriale di produzione tramite stampaggio.

5.2 Tecniche realizzative

Qui a seguire una breve survey sulle tecniche adoperate per la produzione dei subarray e successivamente dell' array di 256 elementi.

5.2.1 Sputtering

Il processo di sputtering nasce con finalità estetiche di rivestimento di superfici metalliche o plastiche attraverso deposizione fisica di vapore (PVD, physical vapour deposition). E' un processo nuovo, che sta prendendo piede perché normalmente utilizzato in contrapposizione alla deposizione galvanica, in quanto metodo considerato 'pulito': il processo avviene all'interno di una camera a vuoto munita del target metallico di preferenza. I target più utilizzati sono Cromo, Acciaio, Titanio , Zirconio ma si effettuano anche realizzazioni in Argento, Oro, e , come nel caso prescelto per questo progetto, Rame. Viene ad esempio comunemente utilizzato nell'industria automobilistica per la realizzazione di parti estetiche cromate (cerchioni o modanature) o funzionali specchiate (parabole dei fari).

Il target metallico funge da catodo che , sotto l'azione degli ioni positivi di un gas ad alto peso atomico (normalmente Argon) immesso nella camera e sottoposto a differenza di potenziale, espelle atomi metallici che condensano sull' oggetto sottoposto al trattamento. Lo sputtering avviene per stratificazione e ciò consente, nel caso in cui si utilizzino target differenti, di realizzare materiali con rivestimenti multistrato. Lo spessore della deposizione è in linea di principio incrementabile a piacimento, in funzion del tempo di esposizione al fascio. Tuttavia si considerano lavorazioni standard quelle che hanno uno spessore di deposizione in un range tra
Per una descrizione più dettagliata degli impianti e dei materiali impiegabili nel processo si rimanda al sito www.kolzer.it o più nei dettagli al link : http://www.kolzer.it/impianti_di_sputtering.pdf
E' importante evidenziare che la pellicola metallica di rivestimento ottenuta a mezzo sputtering segue fedelmente il profilo del substrato sul quale va a depositarsi. E' importante pertanto il processo di preparazione del materiale da sottoporre a sputtering, così come lo è la verniciatura del substrato che serve per favorire l'implantazione degli atomi metallici.edevitare la sfoliazione della pellicola.
Il processo prevede le seguenti fasi:
Verniciatura (amano nel caso di parti molto piccole, viceversa con robot) : nel caso dei subarray si è scelta la prima opzione, mentre per l'array, avente dimensioni più estese, si è proceduto attraverso metodi di verniciatura robotizzata.
Sistemazione del campione all'interno della camera a vuoto, in modoi da favorire , attraverso opportune rotazioni del portacampione, la corretta esposizione delle superfici da sottoporre a sputtering.
Ottimizzazione dei parametri energetici della camera, in funzione del risultato desiderato.
sputtering in camera a vuoto: il tempo è variabile a seconda dell'obiettivo e dello spessore della deposizione desiderato. Il tempo caratteristico per lavorazioni considerate 'standard' è circa 20'. Si vedrà di seguito come il tempo sia stato ottimizzato nel caso di specie a valle di tentativi ripetuti di affinamento del risultato.

5.2.2 Rapid Prototyping

La prototipizzazione rapida (RP) è un processo di realizzazione veloce di campioni, solitamente adibiti a prototipi o a preserie: questi possono presentare geometrie qualsivoglia complesse, dato che la loro realizzazione viene fatta a partire dal modello tridimensionale CAD (STL) . I materiali utilizzabili sono

svariati, a seconda delle esigenze. Il processo è una sinterizzazione a partire da una polvere plastica con crescita verticale dell'oggetto.
Nel caso specifico è stata utilizzata una sinterizzazione a partire da una resina trasparente con trattamento 'full cure' ad alta definizione che ha consentito un accuratezza nella realizzazione dei particolari pari a +/- 0.1 mm lineari.
Il vantaggio maggiore di utilizzare il RP è stato quello di poter disporre di campioni da testare in brevissimo tempo (consegna in 3 giorni dal momento del ricevimento dell'ordine) a fronte di un esborso economico modesto, consentendo di realizzare una serie di test di messa a punto del processo di sputtering e del disegno radiometrico definitivo.
Possibili svantaggi sono da imputarsi alla variazione dimensionale (che comporta l'accuratezza di cui sopra) dovuta al raffreddamento dell'oggetto a termine processo) e la finitura superficiale che, nel caso in cui non venga applicata una vernice coprente, presenta una spiccata porosità superficiale.
Va notato che i campioni realizzati possono essere, interamente o limitatamente ad alcune sole superfici, verniciati con una resina trasparente, così da ridurre fortemente la porosità superficiale. Questa opzione si è rivelata importante per le parti funzionali dei campioni realizzati , poiché per alcuni di essi, il fatto di non aver praticato alcuna verniciatura è stato causa di forti discontinuità elettriche che ne hanno compromesso il corretto funzionamento. Questa problematica è descritta più estesamente nel §5.4.2.

5.2.3 Lavorazioni di macchina

Fresatrici e tornio a controllo numerico sono stati utilizzati per produrre i subarray in Derlin e ottone e le antenne dielettriche in Rexolite. L'accuratezza di lavorazione meccanica è sicuramente superiore alle lavorazioni in RP e ciò ha consentito di realizzare parti a perfetto accoppiamento meccanico di interferenza (vedasi ad esempio il guscio superiore e inferiore del subarray in guida d'onda o l'accoppiamento tra le antenne in Rexolite e le cave che le alloggiano)

5.3 REALIZZAZIONI HARDWARE PER SUBARRAY

I campioni realizzati per testare il disegno RF e per caratterizzare il processo di sputtering sono i seguenti:

SCHEMA IN GUIDA D'ONDA:

a) 3 Serie di campioni realizzati in RP
b) 3 serie di campioni realizzati in Derlin
c) 1 serie di campioni realizzata in Ottone
d) Trasformatore in RP
e) Trasformatore in Derlin
f) Due trasformatori in ottone
g) Guida d'onda in RP
h) Guida d'onda in Derlin

SCHEMA IN MICROSTRISCIA:

i) 3 serie di campioni in RP
j) 3 serie di campioni in Derlin
k) Non è stato possibile, analogamente al punto precedente, realizzare un campione in ottone poiché il circuito in microstriscia
l) Circuito di alimentazione 4 elementi in microstriscia serie
m) Circuito di alimentazione 4 elementi in microstriscia parallelo
n) Vari circuiti per valicare il design dell'alimentazione (spessore delle strip, bend, etc..) e il disadattamento dei connettori.

5.3.1 Subarray in guida d'onda

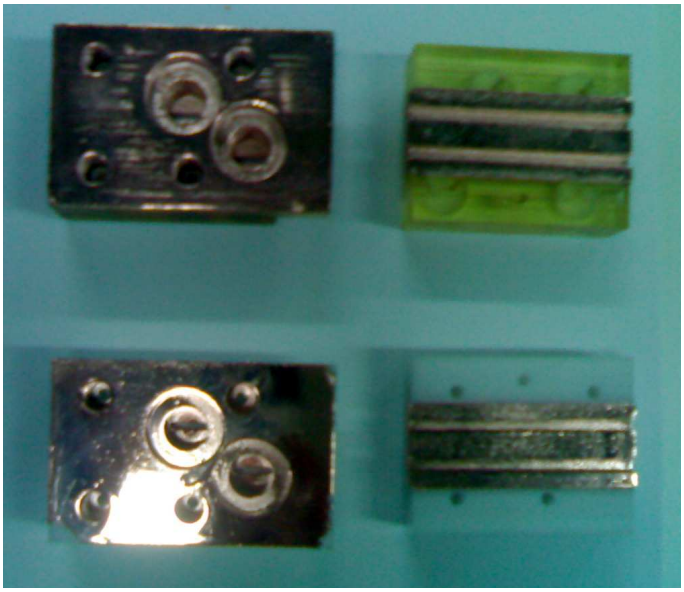


Figura 14 subarray in guida a 2 elementi : campione in RP (pannello superiore) e in Derlin (pannello inferiore)

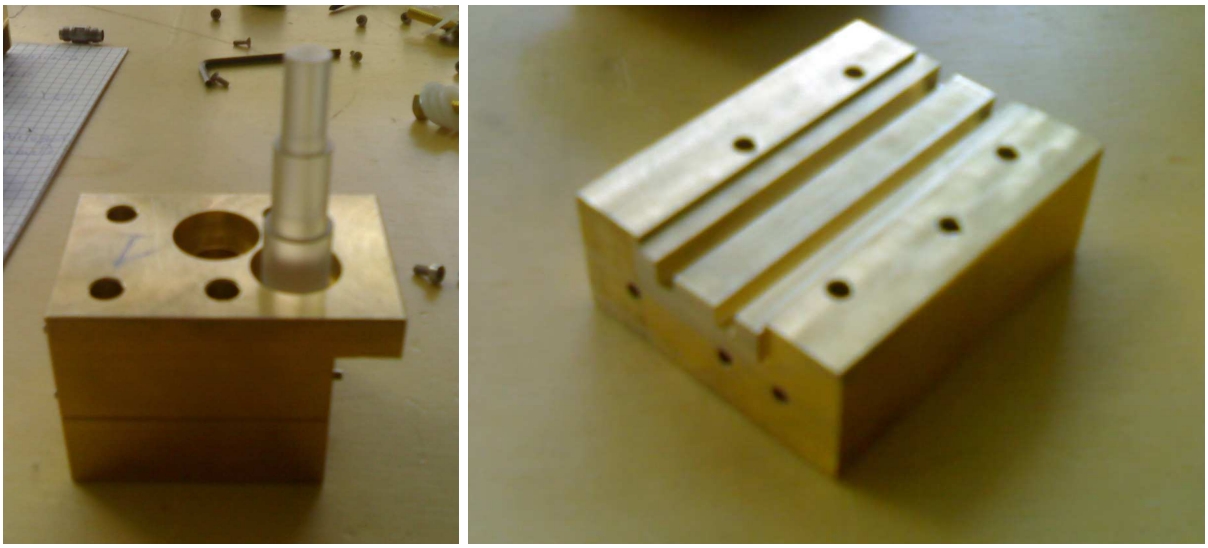


Figura 15 subarray in guida a 2 elementi prodotto in ottone come misura di riferimento.

Figura 16 confronto tra I campioni di ottone (in alto, connesso ai due trasformatori) in resina (RP, a sinistra) e in Derlin (fresa a controllo numerico, destra)

5.3.2 Subarray in MS

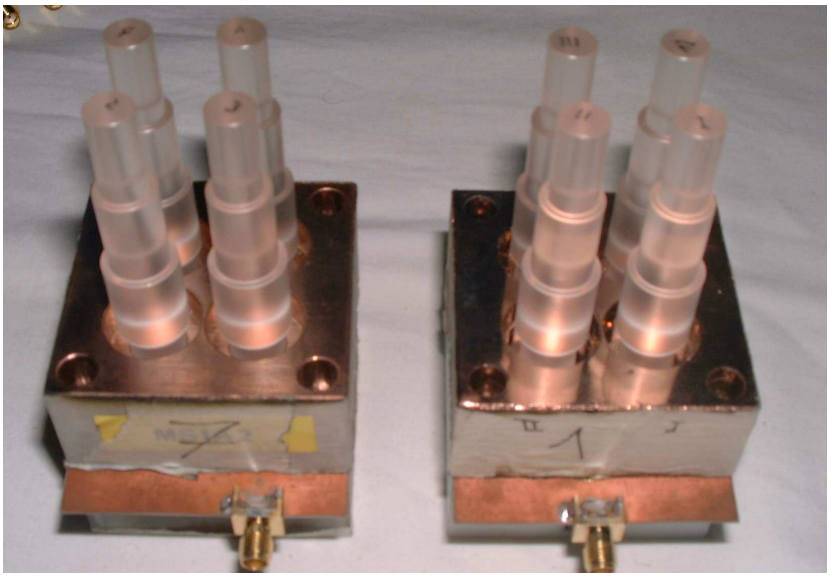


Figura 17 a confronto campione prodotto in RP (sinistra) e di fresa in Derlin (destra)

5.3.3 Alimentazione di subarray in microstriscia

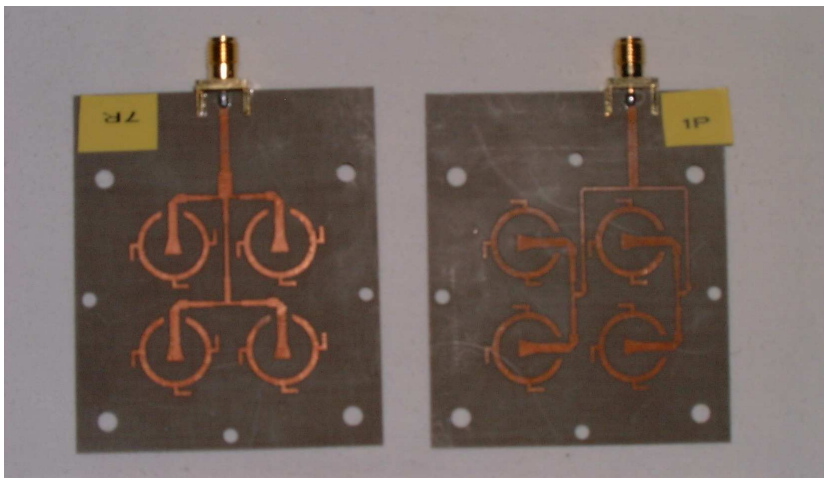


Figura 18 a confrontoi due sche mi alimentazione modellati e testate , in serie e in parallelo.

5.4 PROBLEMATICHE INCONTRATE LEGATE AL PROCESSO PRODUTTIVO DEI CAMPIONI

La messa a punto del processo di sputtering è stata laboriosa e ha richiesto del tempo e varie prove sui campioni. sono state realizzate tre serie di campioni in RP in resina e tre serie degli stessi campioni lavorate di macchina in Derlin. In

entrambi i casi si è realizzato lo sputtering su campioni preventivamente verniciati e non.. I risultati iniziali hanno evidenziato una serie di problemi di varia natura , sintetizzabili come segue:

- adesione meccanica dello sputtering
- tenuta meccanica (esfoliazione) della pellicola metallica
- bruciature superficiali
- superficie 'imbarcata' (cioè deformazione probabilmente dovuta alla temperatura raggiunta dal target)
- scabrosità della superficie metallizzata
- sputtering a buccia d'arancia
- alta resistività elettrica tra due punti per i quali è richiesto un buon contatto elettrico

Le cause di queste non idealità sono state di volta in volta analizzate, comprese e superate nella serie successiva. In sintesi, sembrano poter essere ricondotte essenzialmente a:

- combinazione tra verniciatura e materiale adoperato (resina full cure o Derlin)
- finitura superficiale di alcune parti in resina al termine della produzione in RP
- tempo di esposizione dei campioni al target metallico durante lo sputtering
- temperatura di esercizio della macchina / distanza del campione dal target metallico.

Un rapporto dettagliato delle evidenze osservative e delle misure eseguite sulla prima serie dei campioni prodotti è riportato in APPENDICE-2 §11; il risultato della misura di resistenza tra punti caratteristici previamente individuati è mostrato in Tabella 1.

Al termine delle prove effettuate su una serie di campioni in resina e su una di campioni in Derlin si è deciso di ottimizzare il processo come segue:

- Sputtering diretto su campioni in resina non pre-verniciati
- Sputtering su campioni in Derlin pre-verniciati
- Tempo di trattamento di sputtering standard X4 (4 cicli completi da 6500 kJ)

5.4.1 Verniciatura

Per alcuni campioni in resina, nelle zone non previamente verniciate (tramite resina) al termine del RP, si è riscontrata una superficie 'pagliettata' che poi ha mantenuto le sue caratteristiche anche in seguito allo sputtering.

Figura 19 scabrosità superficiale della deposizione dovuta alla porosità del substrato in RP: le regioni che mostrano questa particolarità sono quelle non trattate (verniciatura) alla fine del processo di RP

5.4.2 Loss – conducibilità elettrica

Misure di resistenza eseguite con l'uso dei terminali di un multimetro commerciale hanno evidenziato che:
i campioni soggetti alle evidenze di cui al paragrafo precedente mostrano una elevata resistenza (vedi Tabella 1 in APPENDICE-2 §11)
Campioni con presenza di effetto 'buccia d'arancia' (Figura 20) non presentano evidente incremento della resistenza, indicando che tale evidenza ha un ruolo funzionale probabilmente marginale.
Campioni in resina che mostrano una copertura disomogenea mostrano una resistenza ancora accettabile ma sensibilmente più elevata (Figura 22)

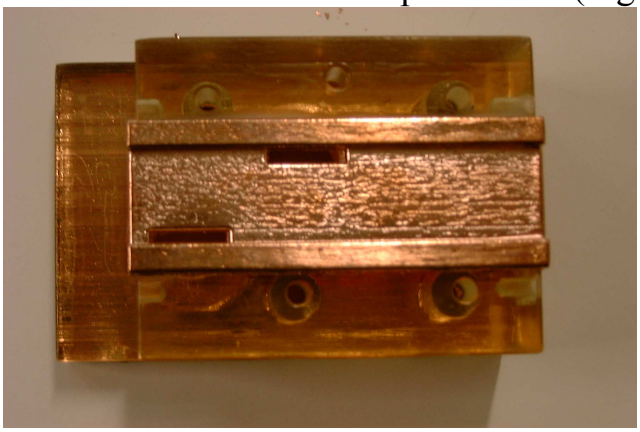


Figura 20 effetto effetto buccia d'arancia su campione in RP trattato

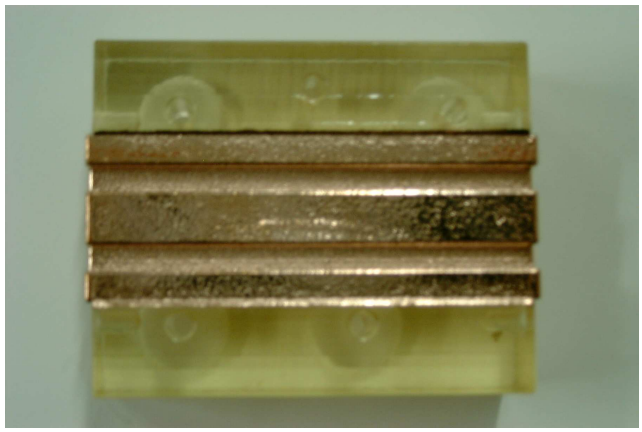


Figura 21 effetto buccia d'arancia su campione in RP trattato

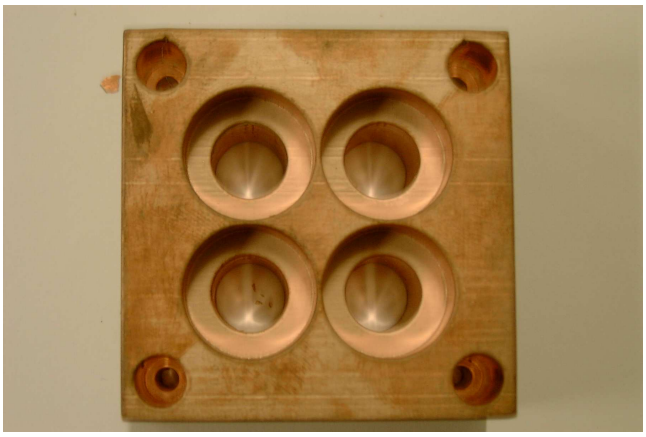


Figura 22 disomogeneità su campione in RP non trattato

5.4.3 Scarsa adesione/ tenuta meccanica

La prima serie ha evidenziato una insoddisfacente adesione della pellicola metallica sui campioni in Derlin non verniciati, come mostrato dalle due immagini seguenti.

Figura 23 problemi di adesione meccanica del metallo sputterato: campione in Derlin non sottoposto preventivamente a verniciatura

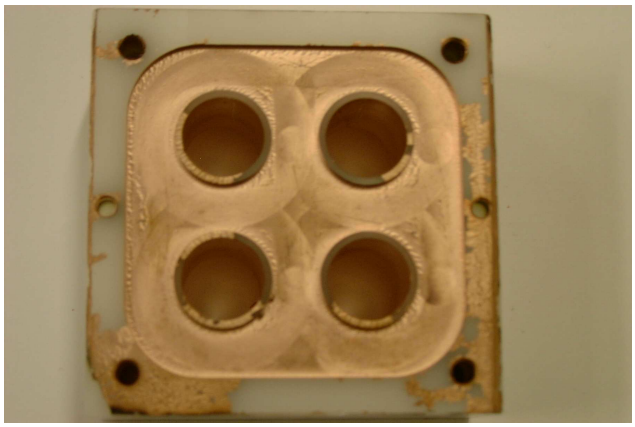


Figura 24 : campione in Derlin non sottoposto preventivamente a verniciatura

5.5 PROBLEMATICHE INCONTRATE LEGATE AL PROCESSO PRODUTTIVO DELLA RETE DI ALIMENTAZIONE

Tutte le reti di alimentazione sono state disegnate presso IASF ma realizzate in officine specializzate esternamente, quindi la loro produzione non ha presentato problematiche di rilievo. Tuttavia , ancora una volta, si è riproposto il problema, già sofferto nel corso del precedente bando, del disadattamento del connettore di alimentazione della linea dovuto alle saldature. Questo problema sembra essere comune anche in letteratura (rif AD6) ed è stato estesamente analizzato e modellato nell' ambito di questo Bando in un lavoro dedicato (AD5). Allo stato attuale delle nostre conoscenze, per quanto si possa ridurre l'effetto facendo particolare cura alla realizzazione delle saldature, sembra comunque essere un inconveniente intrinsecamente ineliminabile.
Lo stesso si presenterà nella fase successiva di produzione dell'array completo ed è caratterizzato e descritto in §8.2.

6 Fase preliminare : misure di subarray

Per le misure elettriche, dei parametri S e di diagramma d'antenna si è utilizzata strumentazione standard presso i laboratori di Navacchio (Pi) di RTW:

Multimetro digitale
network vettoriale
amplificatore 10 dB per compensare perdite nei cavi
camera anecoica
componentistica RF standard

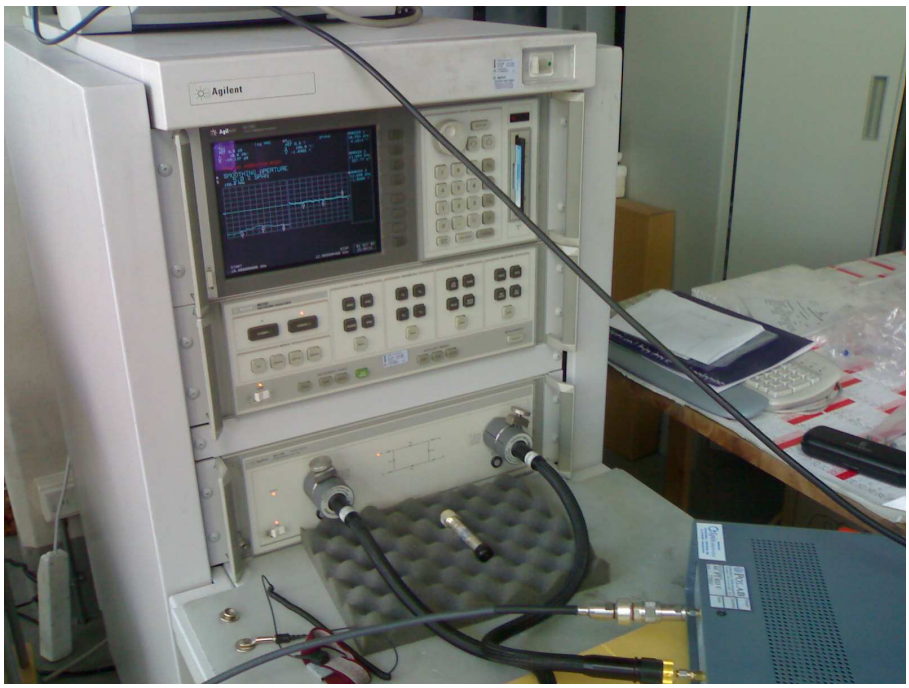
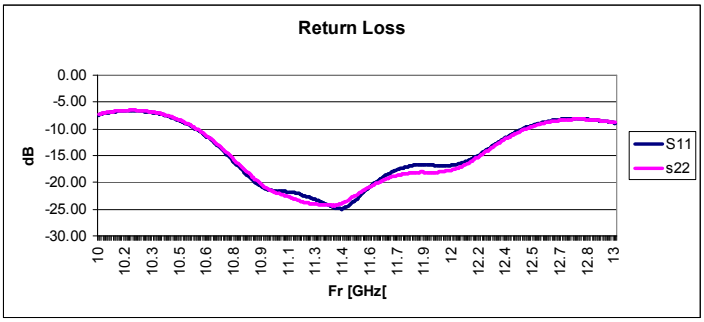


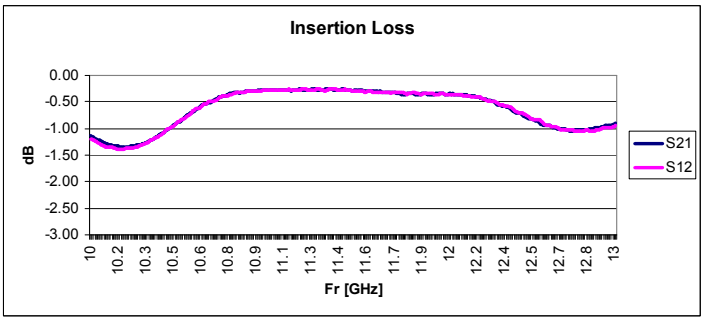
Figura 25 dettaglio della apparecchiatura impiegata per I test a banco: in evidenza il network vettoriale e l'amplificatore 10 dB.

6.1 ALIMENTAZIONE IN GUIDA D'ONDA

6.1.1 Trasformatori in cascata



Plot 1



Plot 2

6.2 ALIMENTAZIONE IN MICROSTRISCIA

I test di caratterizzazione dei circuiti sono stati realizzati seguendo due strade differenti :
caratterizzando i singoli elementi di circuito
caratterizzando i circuiti una volta accoppiati ai subarray.
Era stata programmata una serie di test di verifica anche da eseguirsi sui singoli circuiti provvisti di carichi adattati a 50 Ohm nei punti di interfaccia con le antenne Goodundo: tuttavia a causa dei tempi ristretti, pur avendo realizzato l'hardware necessario ai test, non si è avuto modo di effettuare le misure.
Ad esempio, nella figura successiva è riportato il test di connessione elettrica di due tratti di microstriscia rettilinei che attraversano due piani di massa contigui. Questo perché in origine esisteva un limite alle dimensioni massime del circuito in microstriscia realizzabile e la soluzione pensata era quella di giuntare due circuiti indipendenti . Questo possibile 'ripiego' si è reso comunque non indispensabile poiché si è trovato un fornitore dotato di apparecchiature non limitate in questo senso.

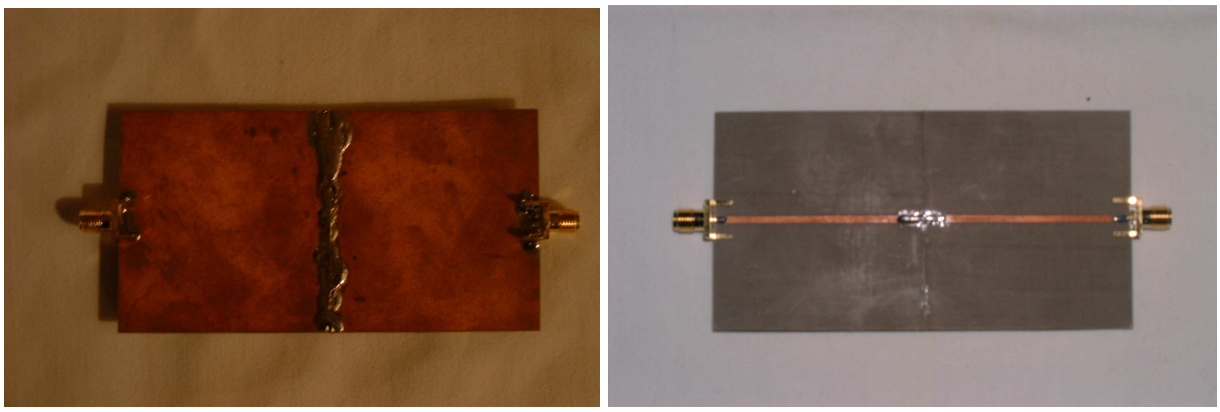


Figura 26 linee in microstriscia rettilinee giuntate

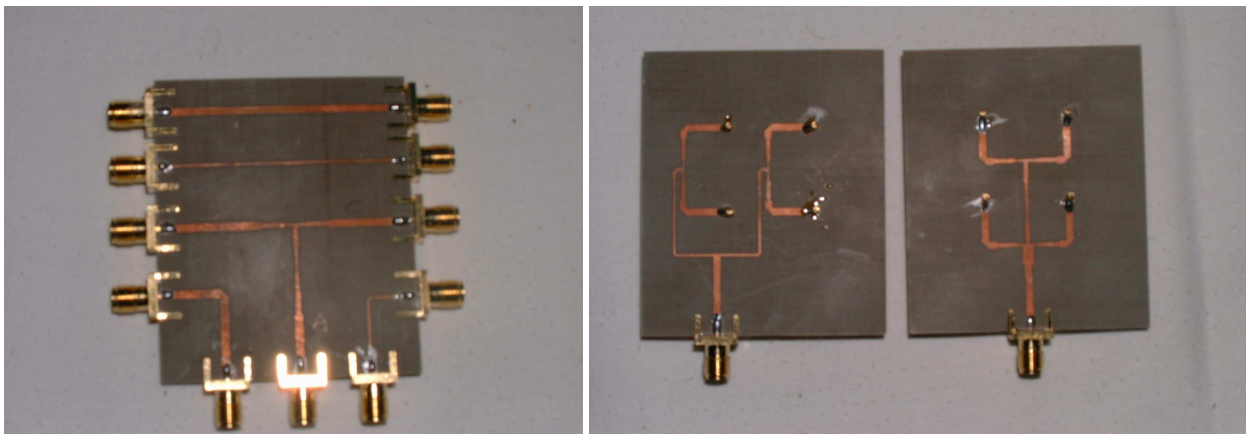


Figura 27 test su line di trasmissione in microstriscia: nel pannello sinistro test su bend, step e power splitters. Nel pannello destro le due linee in serie e parallelo terminate su connettori SMA

6.3 SUBARRAY IN GUIDA D'ONDA

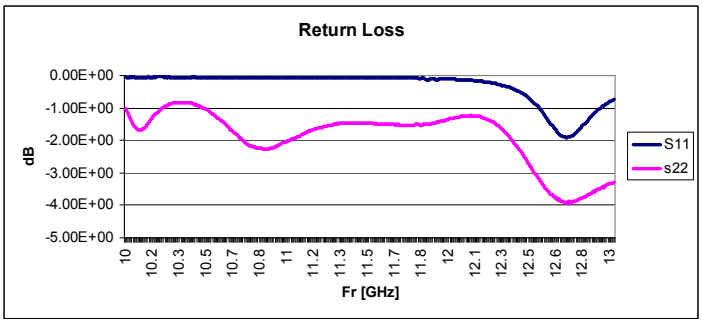
6.3.1 Conducibilità elettrica

Le misure erealizzate col multimetro hanno fornito risultati buoni della resistenza, tutti al di sotto di 0.4 Ohm , tra qualunque coppia di punti attesa in contatto elettrico.

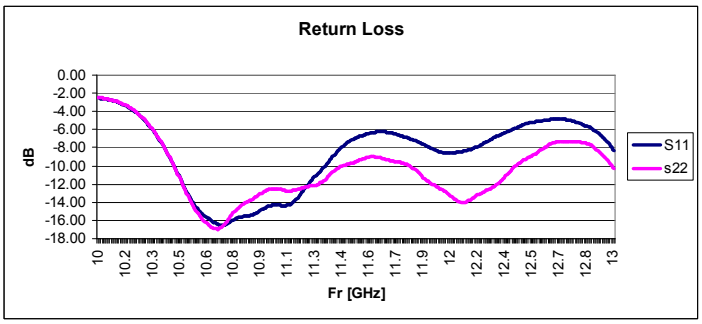
6.3.2 Caratterizzazione a banco

Essa è stata realizzata in due differenti modi: terminando la porta 2 con uno short a lambda /4 (Plot 3) oppure con un secondo trasformatore (Plot 4). I risultati più interessanti provengono di fatto dal secondo caso, nel quale si vede che, anche nel

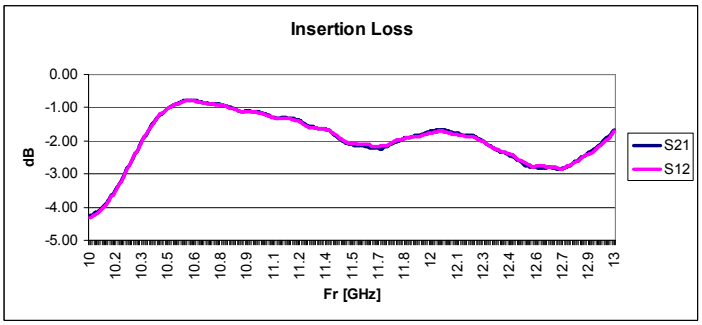
caso in cui la rete volesse essere estesa a più elementi, un buona parte della potenza risulterebbe ancora disponibile. Questa caratteristica deve essere studiata più approfonditamente, poiché inattesa.
Nel caso del Plot 3 invece, il sistema sembra funzionare decisamente meglio quando alimentato dal lato in cui sarebbe invece previsto il posizionamento dello short. Anche questa difformità rispetto alle attese rimane da esser studiata ulteriormente e compresa appieno.



Plot 3 diagrammi di Return loss per la combinazione: trasformatore + antenna + flangia cieca



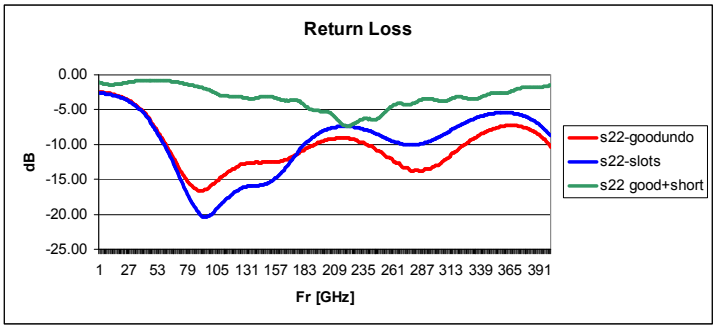
Plot 4 diagrammi di Return loss per la combinazione: trasformatore + antenna + trasformatore



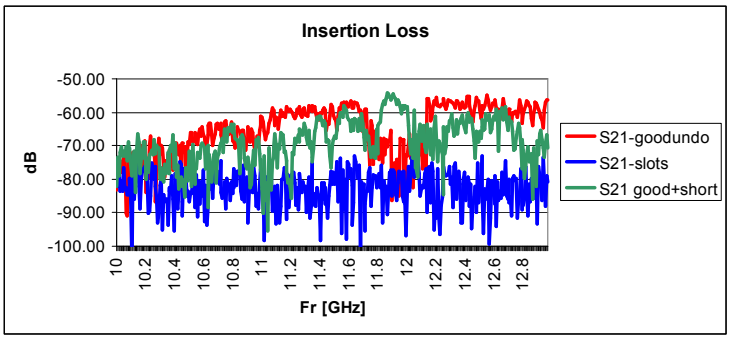
Plot 5 diagrammi di Insertion loss per la combinazione: trasformatore + antenna + trasformatore

Il confronto tra il Return loss (Plot 6) e l'insertion loss (Plot 7, misurato come coniugato della potenza ricevuta da una antenna ridged posta davanti al dispositivo) nei tre casi in cui il sistema è stato terminato sullo short , su un carico adattato (50 Ohm) o le antenne Goodundo sono state rimosse (lasciando le slot disadattate) conferma che nel

secondo caso, a fronte di un miglioramento di Return loss si riscontra anche una potenza effettivamente disponibile più elevata.



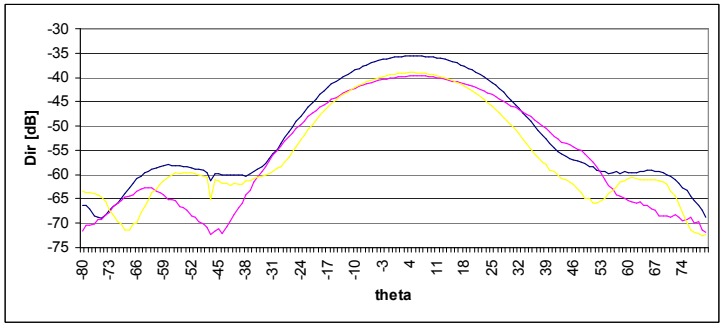
Plot 6 return loss nei tre casi di cui sopra



Plot 7 potenza ricevuta dalla antenna ridged usata per le misure di pattern: il caso in cui il dispositivo è terminato su un carico adattato e non con uno short sembra essere effettivamente il migliore, in accordo con un miglior S11

6.3.3 Caratterizzazione in camera anecoica

La caratterizzazione è avvenuta, a causa del difficile setup sperimentale, solo sul piano H. E' riportato qui di sotto il comportamento in banda.



Plot 8 pattern -90° + 90° piano H, alle tre frequenze 10.7, 11.7 e 12.7 GHz

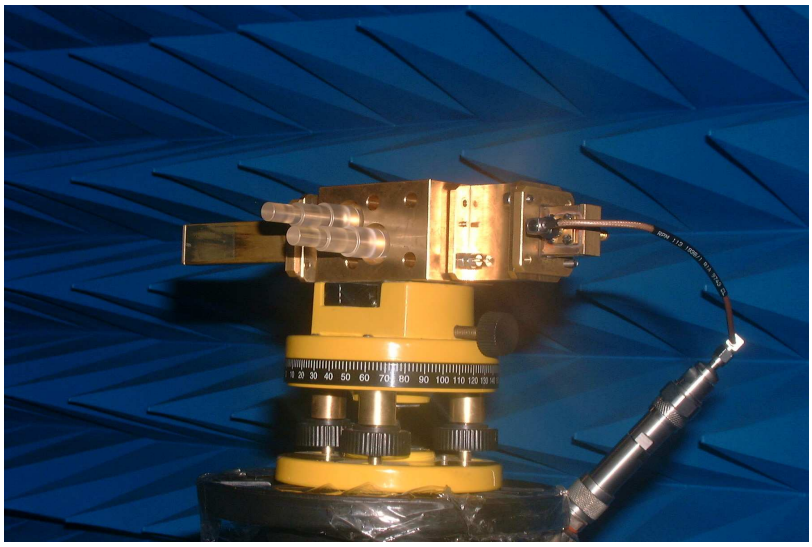


Figura 28 dettaglio del setup sperimentale per la misura di pattern in camera anecoica

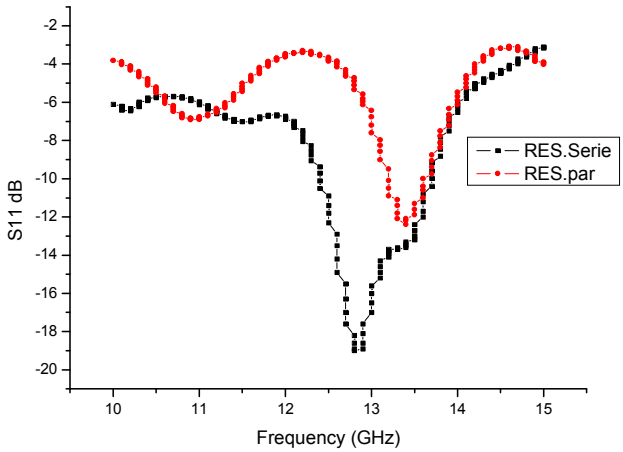
6.4 SUBARRAY IN MS

6.4.1 Conducibilità elettrica

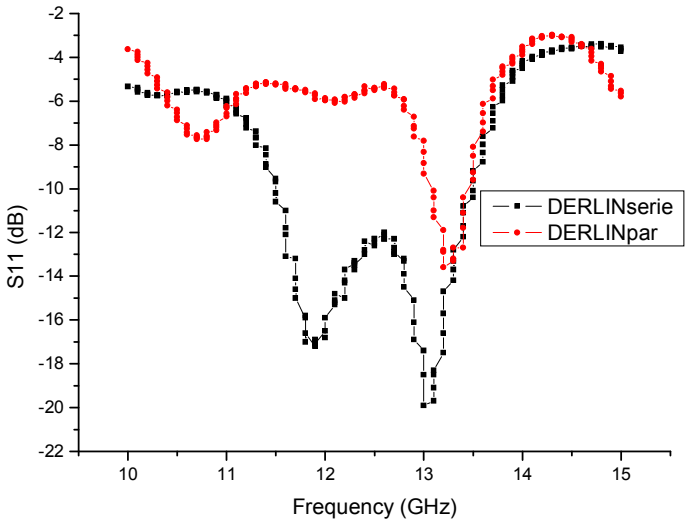
Le misure realizzate col multimetro, anche in questo caso come nel precedente, hanno fornito risultati buoni della resistenza, tutti al di sotto di 0.4 Ohm , tra qualunque coppia di punti attesa in contatto elettrico.

6.4.2 Caratterizzazione a banco

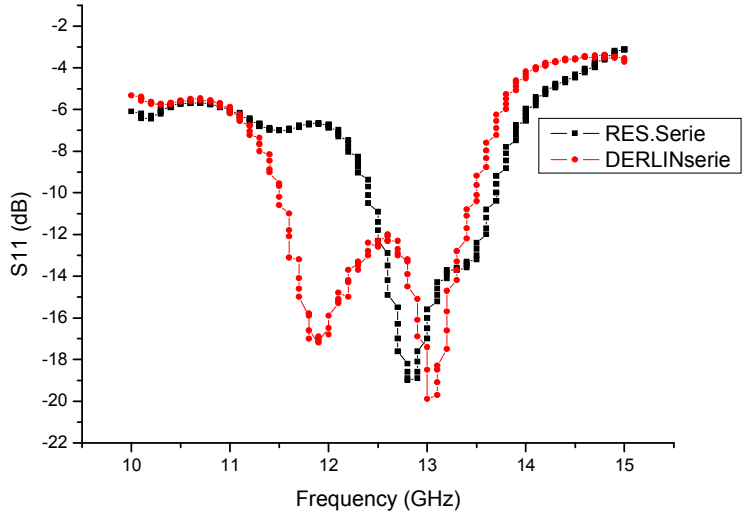
Sono stati determinati i parametri S per entrambi i circuiti, in serie e in parallelo, misurati. Non sono state evidenziate differenze sostanziali tra le due differenti modalità di realizzazione dei campioni testati: Rp (campioni in resina non pre-verniciati) e fresa (campioni in Derlin, pre-verniciati). Tuttavia la banda favorevole di quelli in Derlin risulta essere più ampia.



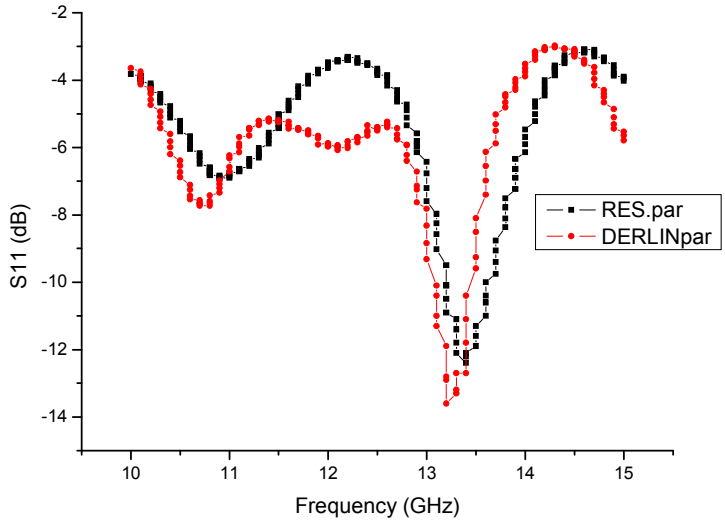
Plot 9 confronto tra circuito in serie e in parallelo per i campioni in resina (RP)



Plot 10 confronto tra circuito in serie e in parallelo per i campioni in Derlin (Fresa)



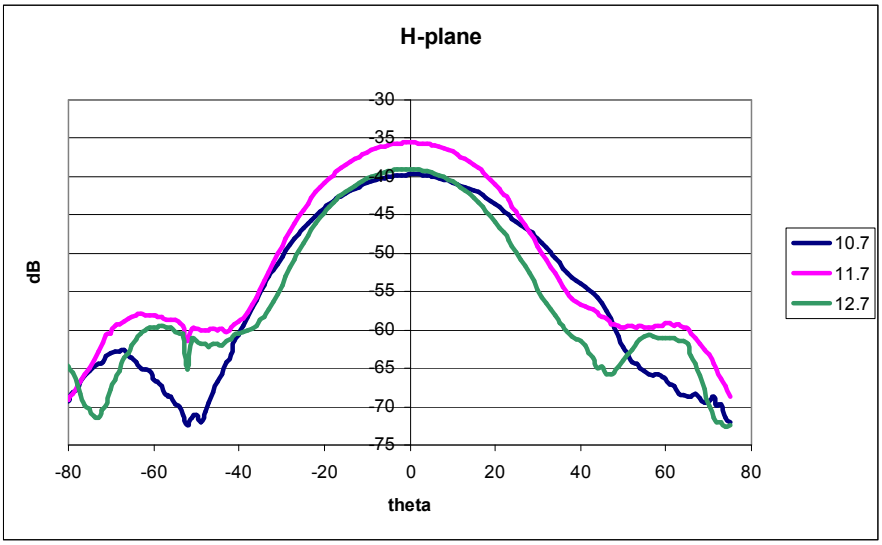
Plot 11 confronto tra campioni realizzati in RP e di Fresa con cirucito in serie



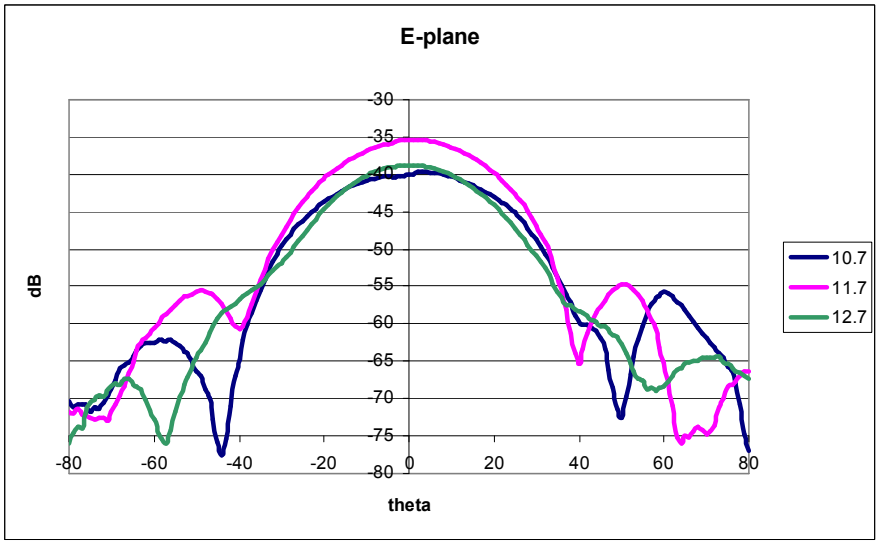
Plot 12 confronto tra campioni realizzati in RP e di Fresa con circuito in parallelo

6.4.3 Caratterizzazione in camera anecoica

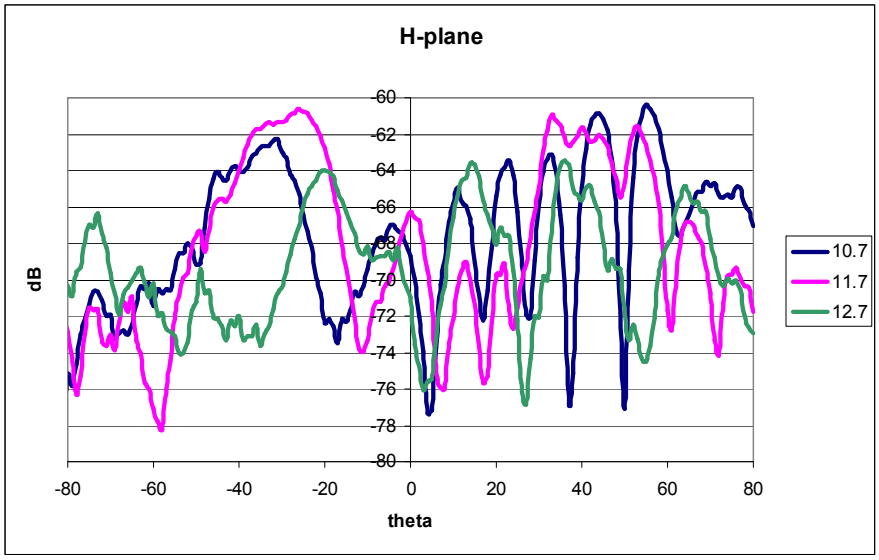
Per questo dispositivo è stato possibile caratterizzare entrambi i piani H ed E sia in Co che in X polarizzazione. Il confronto col modello analitico mostrato nel paragrafo successivo indica che il sistema è ormai ben compreso e il suo comportamento predicabile entro un buon livello di accuratezza.



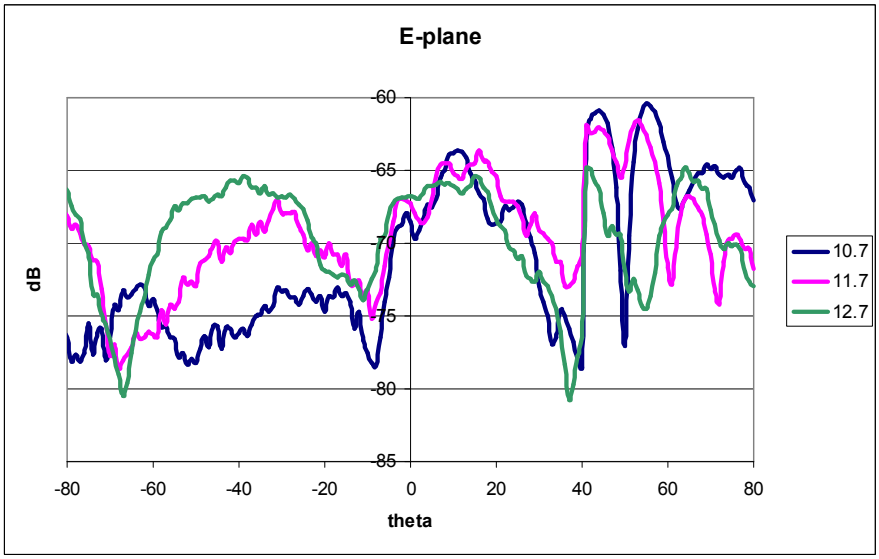
Plot 13 pattern -90° + 90 ° Piano H



Plot 14 pattern -90° + 90 ° Piano E



Plot 15



Plot 16

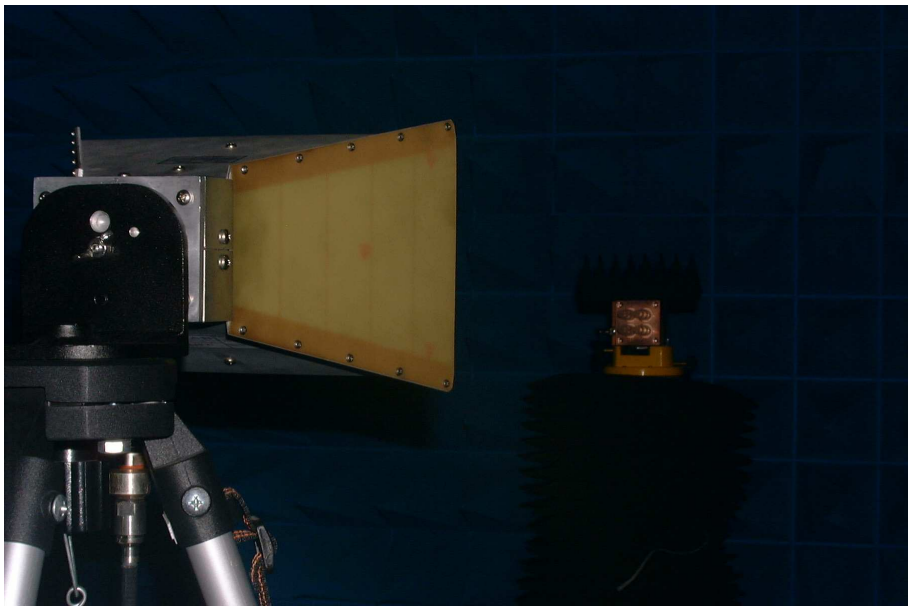


Figura 29 misura di pattern con antenna ridged

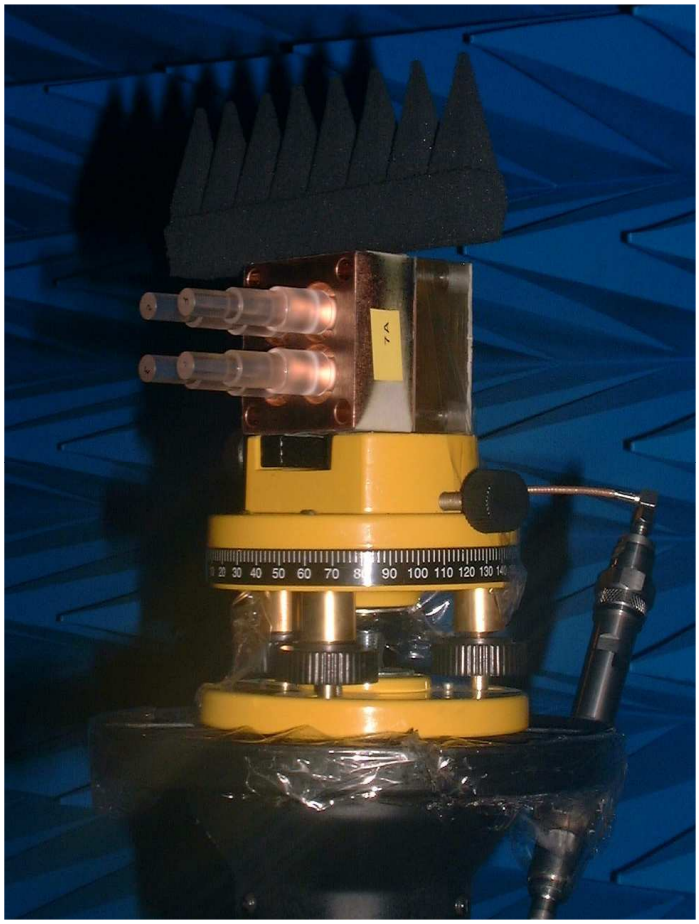
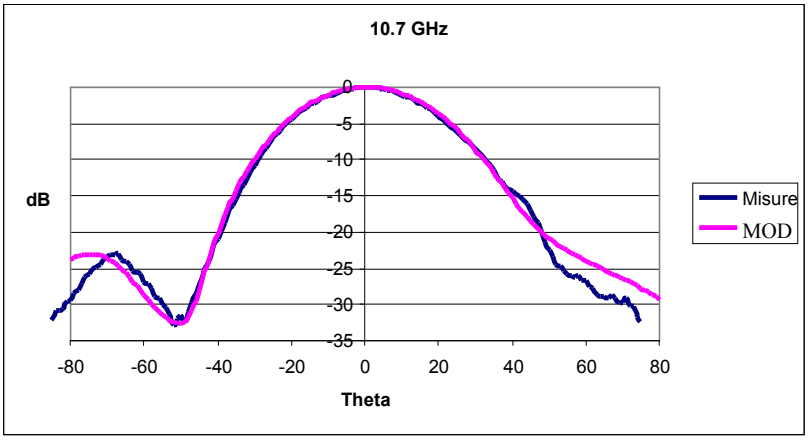


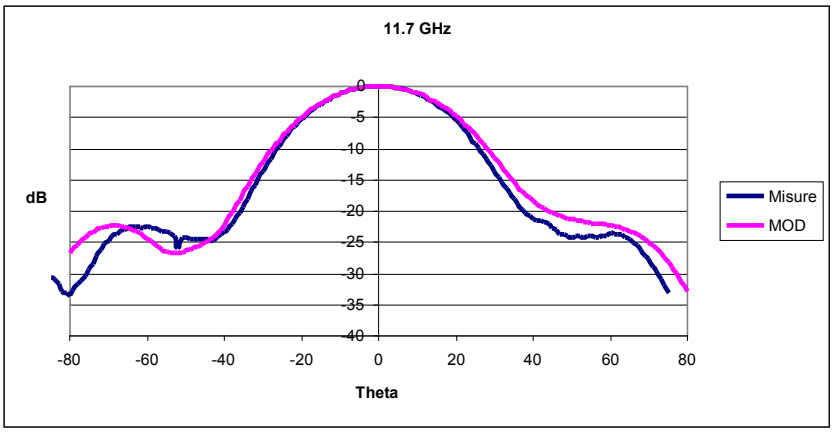
Figura 30 dettaglio della misura di pattern

6.4.4 Confronto col modello

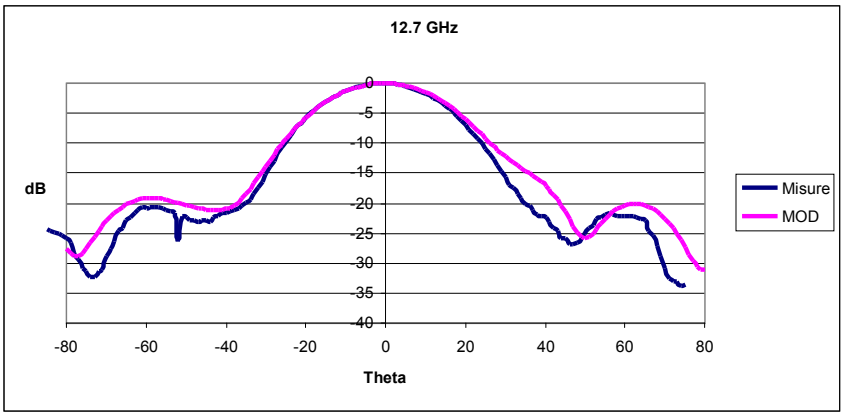
6.4.4.1 Piano H



Plot 17

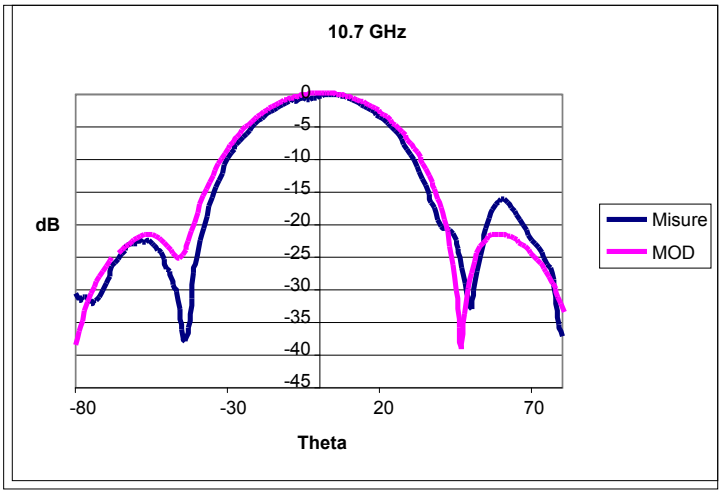


Plot 18

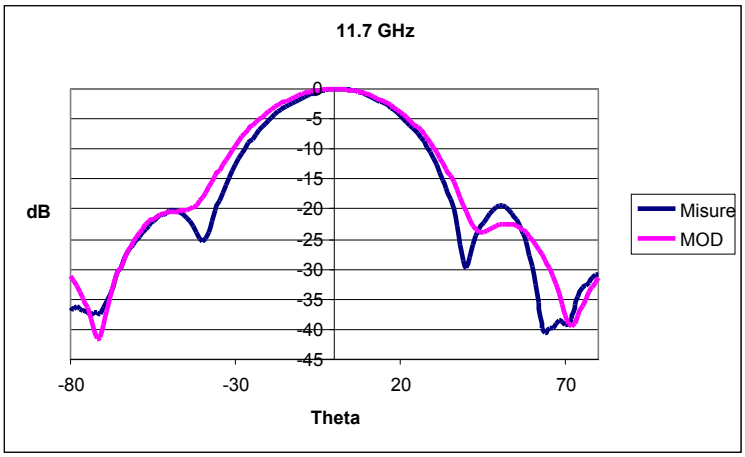


Plot 19

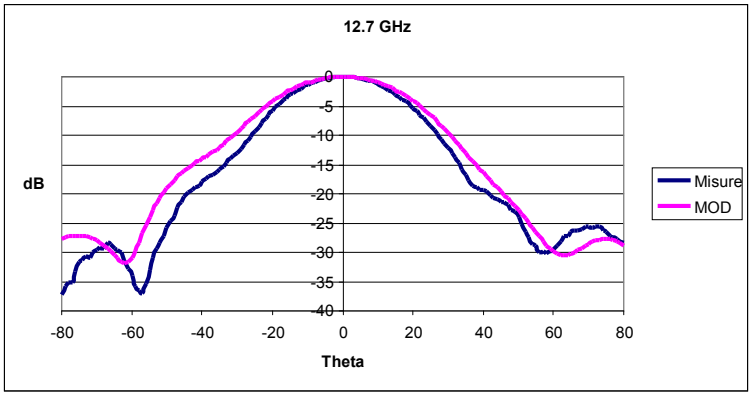
6.4.4.2 Piano E



Plot 20



Plot 21



Plot 22

6.5 La 'ricetta' e la scelta del modello 'standard' per l'Array

Le svariate prove effettuate sulle serie di sub-array hanno consentito di raffinare il metodo di produzione così da ottenere una 'ricetta' ottimizzata per la produzione dell'array finale. Questa tiene conto di alcuni fattori critici come lo spessore e la uniformità della verniciatura, la posizione dei campioni rispetto al target metallico, l'energia della macchina , il tempo del processo e i numeri di cicli. Sull' ultima serie di sub-array è stato dunque testato il processo standard, verificando la eventuale possibilità di ridurre i tempi di esposizione al fascio o il numero di cicli.
E' stato riscontrato che , sebbene le indicazioni fossero comunque buone, era tuttavia conveniente, nella prospettiva di minimizzare le perdite elettriche e ridurre i rischi, mantenere valide le specifiche del processo ottimizzato.

7 Fase finale : l' Array di 256 elementi

7.1 LA RETE

7.1.1 Il modello elettrico

Il modello elettromagnetico della rete è stato sviluppato a partire da quelli dei subarray. A causa delle difficoltà mostrate dalla alimentazione in guida d'onda, e soprattutto della mancata comprensione di alcune non idealità impreviste, si è preferito procedere esclusivamente sul binario della rete in microstriscia. In particolar modo si è preferito lo schema in parallelo che sembra poter garantire un modello analitico più solido anche se pagando il prezzo di una occupazione spaziale superiore (con conseguente crescente distanza tra le antenne).

7.1.2 L' Hardware

Plot 23

7.2 LA MATRICE RADIANTE

7.2.1 Disegno elettromagnetico

Il design elettromagnetico è figlio del design di subarray, che si può considerare cella elementare dell'array finale, composto dunque di 8X8 celle. Il numero di elementi totale (2^8) è scaturito dal compromesso tra la necessità di testare il design su un numero elevato di elementi che potesse coprire una superficie rappresentativa di quella di una parabola satellitare commerciale e esigenze di natura realizzativi meccanica ed elettrica. Il numero di 256 elementi è sembrato essere un ragionevole trade-off. La spaziatura non uniforme è stata indotta da necessità costruttive del circuito in microstriscia: la spaziatura tra i subarray è maggiore di quella tra le singole unità di un subarray (goodundo), di modo da consentire un agevole routing del circuito in microstrsicia.

7.2.2 Disegno meccanico

La soluzione adottata è stata ancora una volta quella dei due semigusci chiusi a sandwich a schiacciare il circuito di alimentazione: al fine di massimizzare l'area di contatto tra la rete di alimentazione e la parte inferiore del semiguscio superiore (consentendo in particolare alle antenne Goodundo di andare perfettamente in battuta sulle patch) si è preferito, diversamente dalla scelta fatta per i subarray, di realizzare questa superficie liscia e senza costole o profili di battuta in rilievo.
La scelta delle viti è scaturita da ragioni meccaniche ed elettromagnetiche. Per compensare la possibile deformazione dei due gusci, dovuta all'esposizione al Target metallico caldo, sono state utilizzate 28 viti in acciaio sul contorno perimetrale; nelle regioni interne invece, per evitare alcun tipo di interferenza elettromagnetica con l'alimentazione, sono state adoperate 12 viti in nylon.

7.2.3 Scelta dei materiali

Sebbene sino all'ultimo si sia puntato alla realizzazione dell'array mediante entrambe le tecnologie esplorate a livello di subarray, e cioè per fresatura meccanica a controllo numerico e per prototipizzazione rapida, difatto, per motivi di opportunità legati essenzialmente alla tempistica si è scelto di perseguire solo la prima strada, comunque in grado di garantire un risultato più accurato.
Pertanto la matrice radiante dell' Array è stata realizzata in Derlin, i Godundo in Rexolite. Per consentire il corretto sputtering della parte inferiore dell'array è stata

invece prodotta, attraverso RP, una maschera di copertura, come si vede rappresentata in Figura 35.

7.3 ANTENNE DIELETTRICHE

Le antenne hanno lo stesso disegno di quelle impiegate per i subarray di questo bando 2006: sono state realizzate a partire da barre cilindriche di Rexolite, lavorate al tornio. Le tolleranze richieste non sono state particolarmente stringenti: si è cercato di sottodimensionare leggermente il diametro di modo che l'accoppiamento con le cave della matrice radiante non fosse ad interferenza stretta, col rischio di asportare, al momento dell'inserimento forzato, parte della pellicola di rame sputterata.

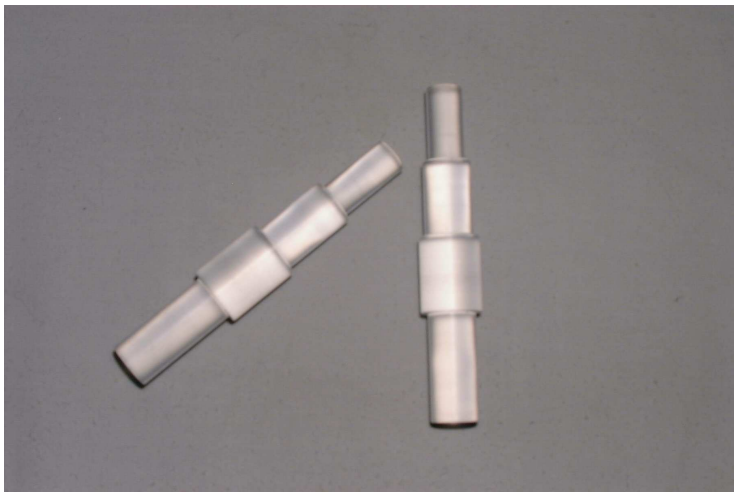


Figura 31 antenne Goodundo

7.4 SPUTTERING

7.4.1 Verniciatura

Date anche le dimensioni maggiori dell'array rispetto ai subarray, è stato possibile modificare la tecnica di verniciatura pre-sputtering, passando dal sistema a mano molto artigianale praticato a livello di subarray ad uno più industriale robotizzato. La verniciatura è stata eseguita da una ditta differente rispetto a quella impiegata per i subarray da Sputtering S.r.l.. I risultati sono stai indubbiamente migliori sia a livello di uniformità della pellicola depositata che di tenuta meccanica della stessa. La verniciatura è stata applicata tanto al guscio superiore che all'inferiore.

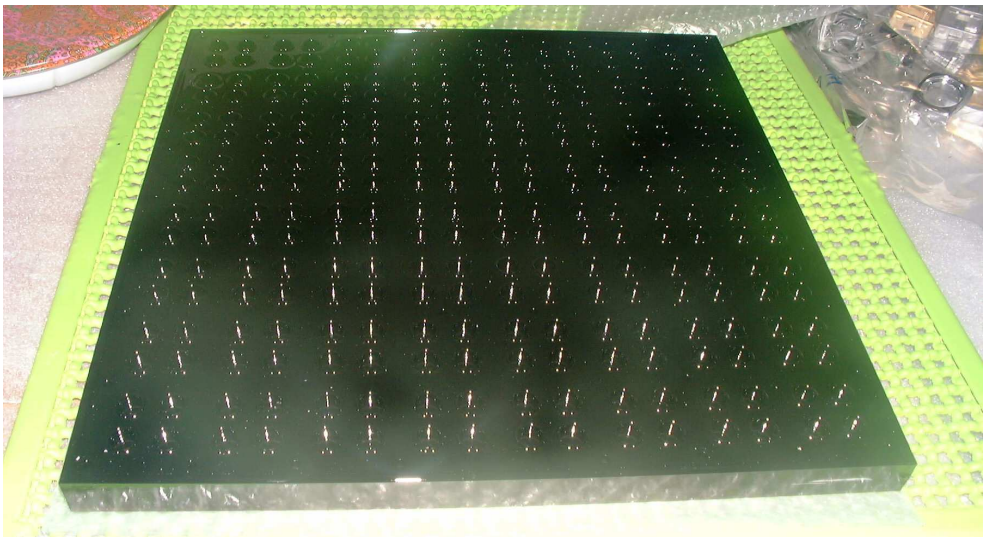


Figura 32 guscio superiore verniciato prima dello sputtering.

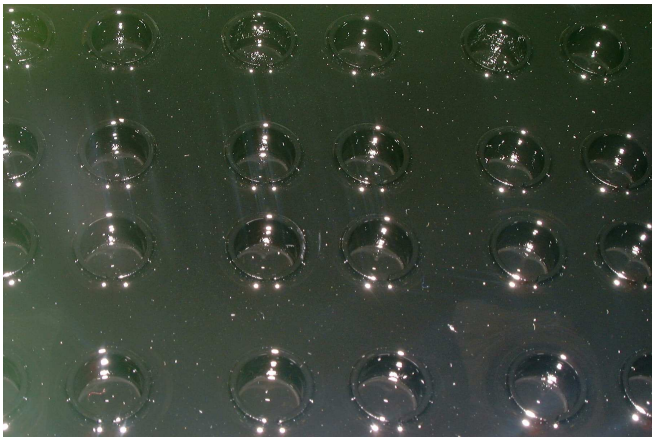


Figura 33 dettaglio della verniciatura pre-sputtering eseguita sul guscio inferiore.

7.4.2 Metallizzazione

E' proceduta secondo la ricetta standard definita previamente. Il guscio inferiore è stato protetto con la maschera prodotta appositamente (Figura 35) . Sono state eseguite due pose in macchina separate per il guscio superiore e inferiore, in modo da poter godere sempre della centralità della posizione rispetto al target (Figura 34). I gusci sono stati fissati a mezzo di viti a un pannello solidale con il portacampioni.

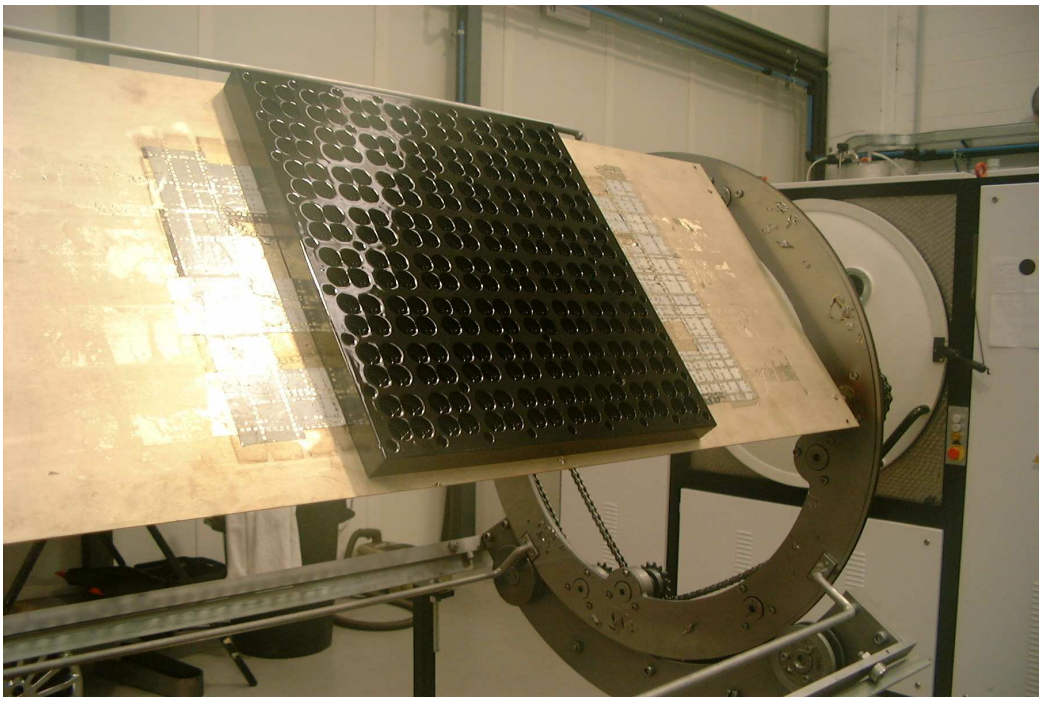


Figura 34 posa in macchina del guscio superiore prima dello sputtering

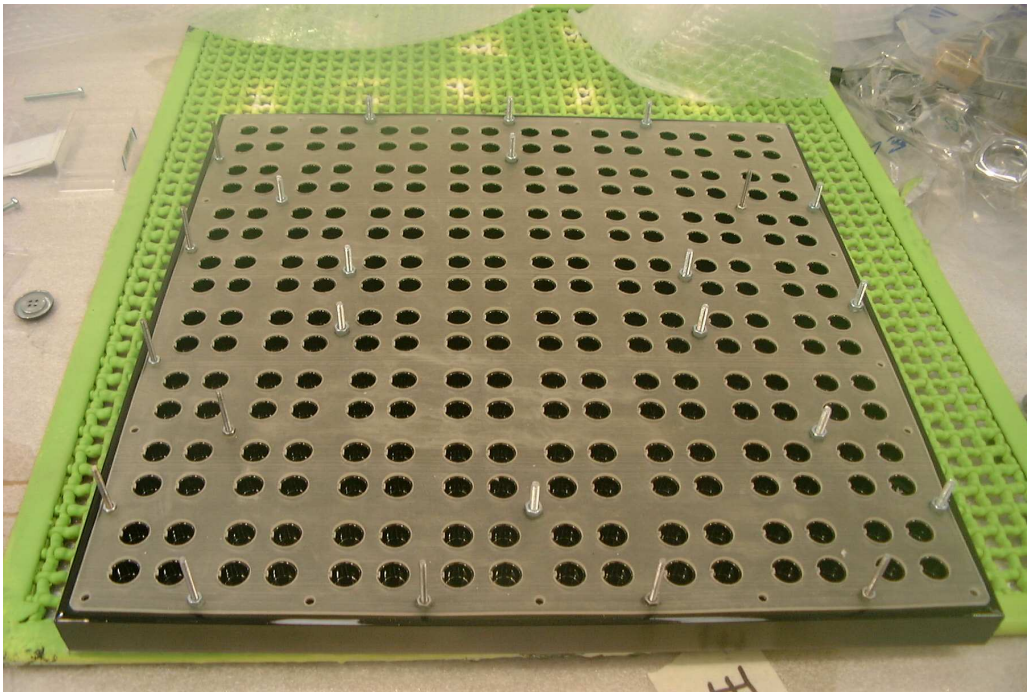


Figura 35 guscio inferiore coperto da maschera dopo lo sputtering

7.5 MONTAGGIO FINALE

In seguito alla verniciatura e allo sputtering l'accoppiamento tra i Goodundo e le cave della matrice radiante cambia. Sebbene questo effetto sia stato tenuto in conto in fase di progettazione, è stato tuttavia necessario procedere a una verifica pratica dell'accoppiamento. Al termine della stessa è stato necessario ri-tornire un piccolo numero di antenne il cui accoppiamento era troppo stretto e rischiava di asportare il metallo.

La scelta di realizzare la maschera tramite RP in materiale flessibile non si è rivelata particolarmente felice: infatti , complice anche la disposizione dei fori di fissaggio delle viti, la non perfetta aderenza al guscio inferiore ha consentito al metallo sputterato di passare al di sotto della maschera e metallizzare anche alcune porzioni di superficie per le quali era non richiesto (Figura 36) . Il rischio che questo effetto potesse in qualche modo accoppiarsi a livello capacitivo con il circuito di alimentazione ci ha spinto a rimuovere la metallizzazione e la pellicola di vernice da ogni punto fatta eccezione per i bicchieri conduttivi. Il risultato è stato buono e il guscio, a termine di questa operazione , si presentava coma in Figura 37 e in Figura 38.

Al termine di questa operazione è stato steso il foglio contenete la rete di alimentazione tra i due gusci che sono stati dunque serrati insieme facendo uso delle viti in metallo (cornice esterna) e nylon (regione interna). Infine i Goodundo sono stati battuti individualmente con un martelletto in gomma per assicurarne il contatto con le patch.

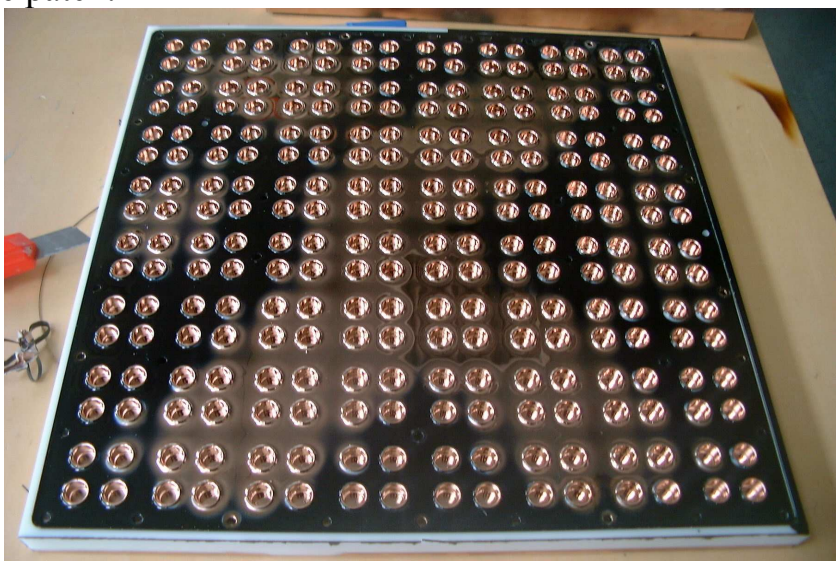


Figura 36 guscio inferiore: effetto della parziale copertura della maschera. Visibili le regioni sputterate.

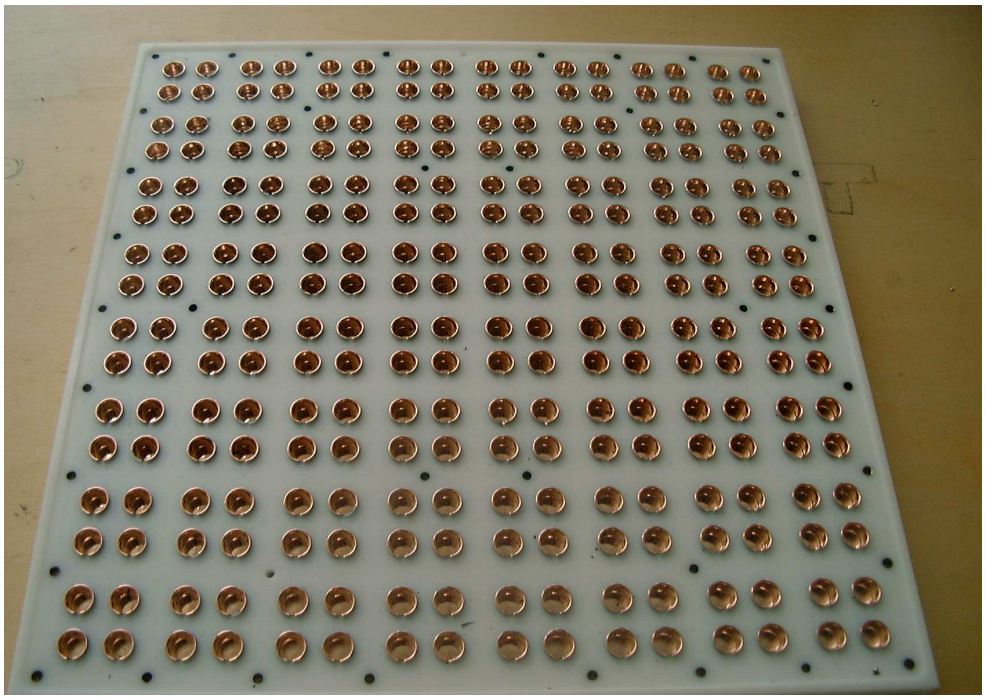


Figura 37 guscio inferiore dopo la rimozione della pellicola di vernice.

Figura 38 dettagli del guscio inferiore prima del montaggio finale.

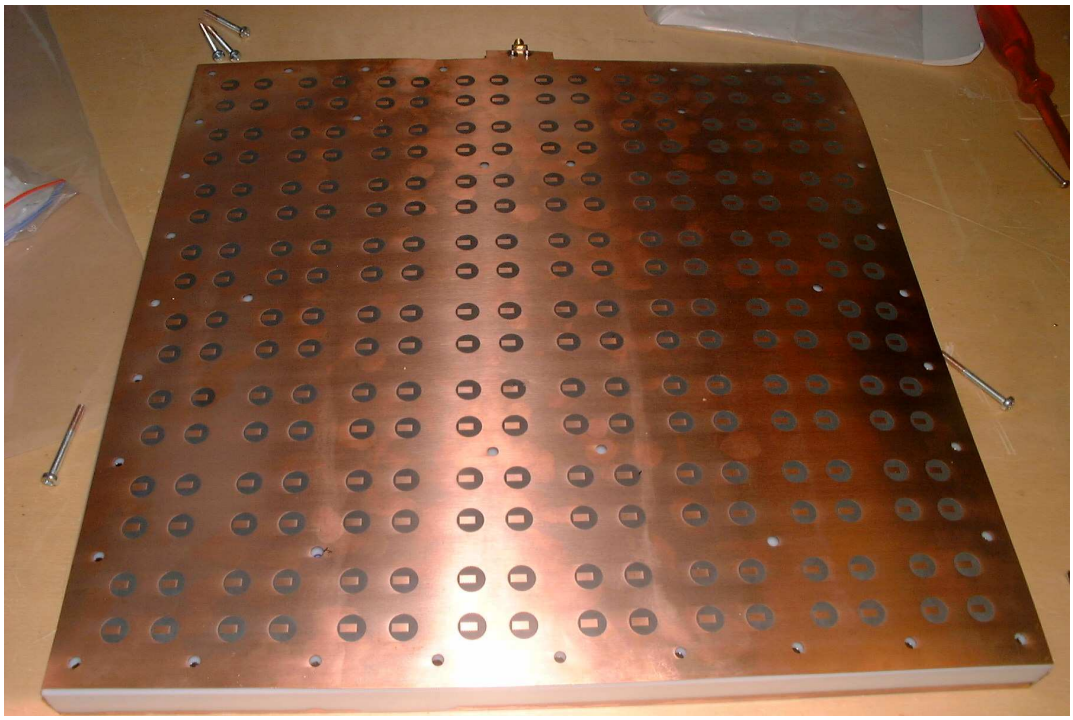


Figura 39 rete di alimentazione stesa sul guscio inferiore prima della chiusura finale

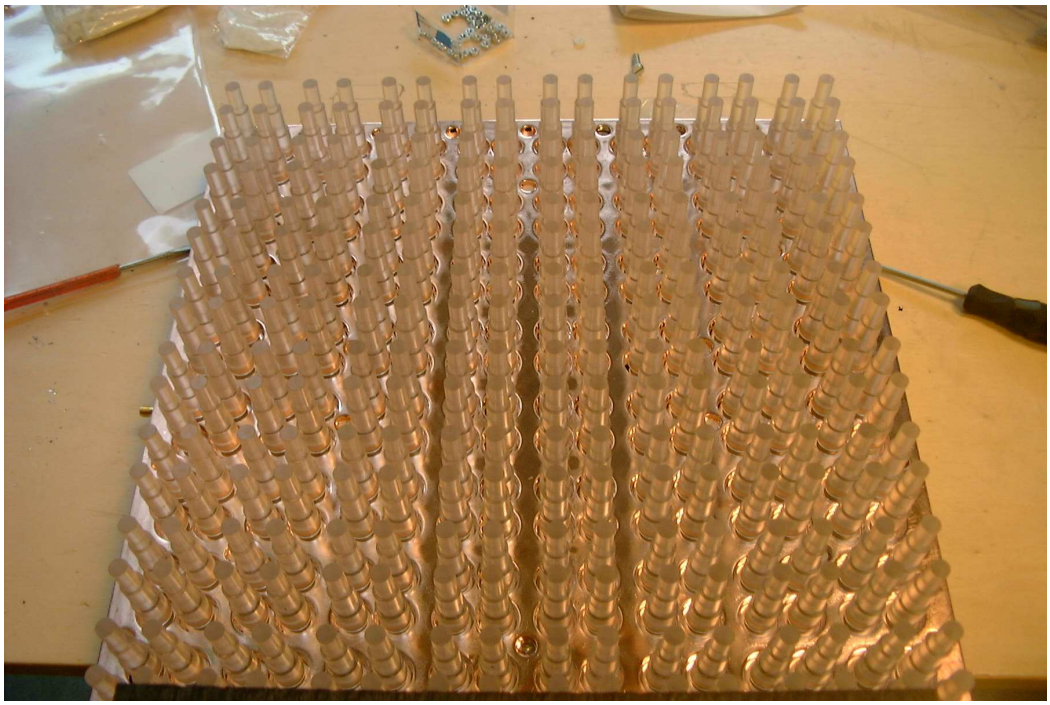


Figura 40 guscio superiore con le antenne Goodundo già montate

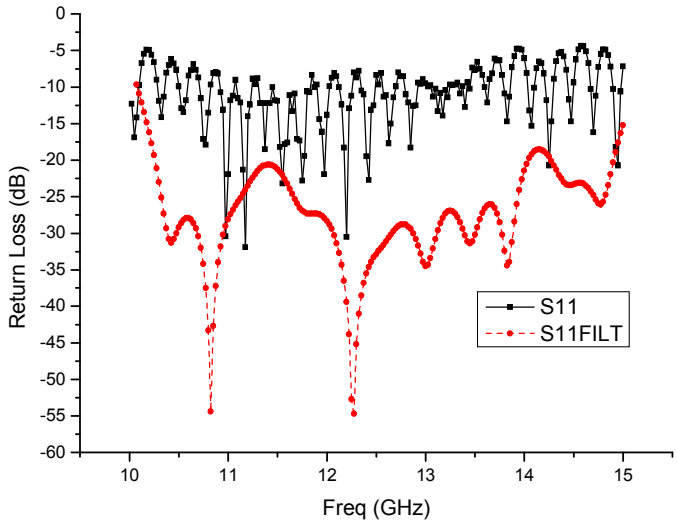
8 CARATTERIZZAZIONE ARRAY

8.1 Conducibilità elettrica

Prima della chiusura definitiva dei due gusci, tramite tester, è stata misurata la resistenza caratteristica tra vari punti del circuito che è richiesto siano in contatto elettrico. In tutti i casi sono stai riscontrati i valori di resistenza attesi, sempre inferiori a 0.5 Ohm, comunque siano stati scelti i punti per connettere i terminali.

8.2 Misure a banco

E' stata eseguita una misura di S11 in banda 10-15 GHz , in ampiezza e fase.



I risultati sono riportati in Plot 24.

Si è poi fatta una analisi del segnale nel dominio del tempo per localizzare la presenza delle eventuali discontinuità. Il diagramma è riportato in Plot 25. toccando il connettore con una punta metallica, o con un dito, si è potuto verificare che il primo picco nell' IFFT corrisponde difatti alla distanza elettrica del connettore, confermando che ancora una volta, come già si era verificato per i subarray, questo è un punto estremamente critico nel circuito,a causa della saldatura (Figura 41)

La stessa analisi qualitativa è stata fatta separando i due gusci e toccando vari punti del circuito per verificare che:

a) ogni punto effettivamente rispondesse, cioè determinasse la crescita di un picco nel dominio del tempo

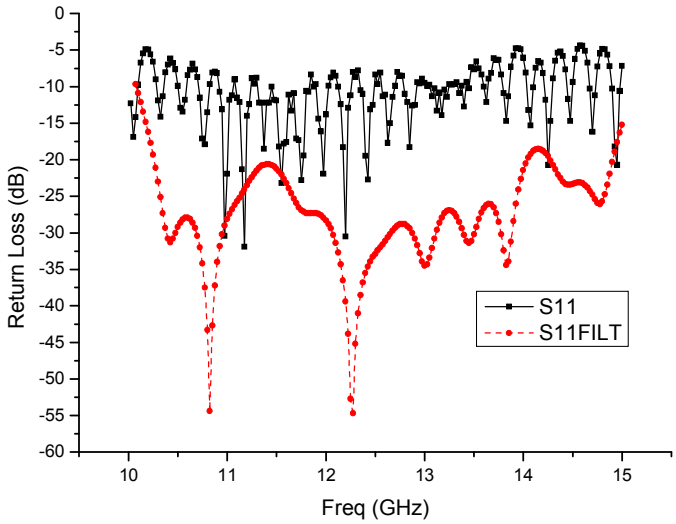
b) punti omologhi del circuito producessero, se toccati, picchi a pari distanza elettrica.

Quanto sopra è stato di fatto confermato dai test.

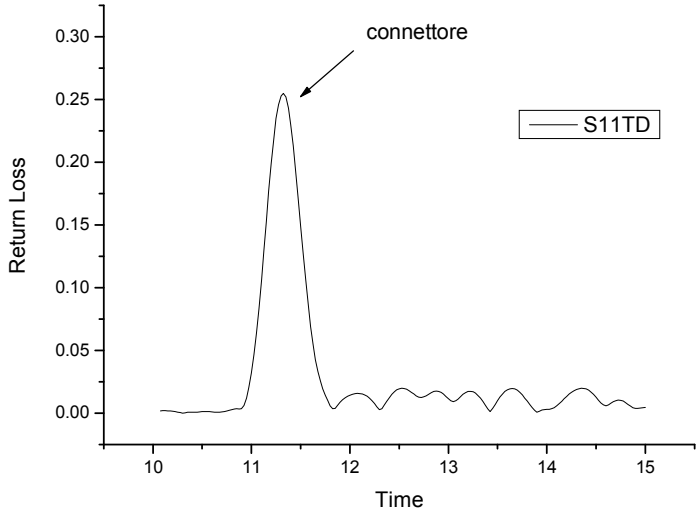
L'effetto della discontinuità del primo picco è stato poi rimosso attraverso un filtering nel dominio del tempo e realizzando l FFT nel dominio della frequenza. Quello che si ottiene è un return loss teorico piuttosto buono: tuttavia il beneficio del dubbio è d'obbligo, dato che:

a) il filtering elimina parte della potenza che diversamente sarebbe disponibile alla regione temporalmente successiva nel diagramma IFFT
b) Il connettore è un filtro passa basso e la discontinuità che introduce non è identica per tutte le frequenze: ciò significa che filtrare il picco relativo al connettore, nel dominio del tempo, può restituire, quando si trasforma nel dominio della frequenza, un diagramma oltre che estremamente favorevole in termini di livello anche distorto in frequenza.

L'effetto creato da un possibile disadattamento dovuto a connettore è stato studiato analiticamente e modellato come descritto in (*** e in ***)



Plot 24 confronto tra S11 misurato (nero) e ottenuto filtrando il primo picco nel TD (rosso)



Plot 25 misura di S11 nel TD: evidente il contributo del connettore nel primo picco

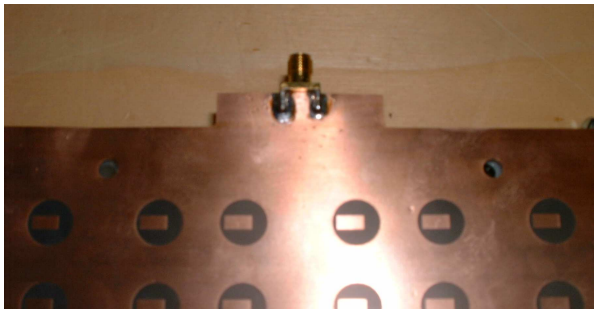


Figura 41 dettaglio di montaggio del connettore sul circuito di alimentazione (vista del piano di massa)

8.3 Misure di emissione in camera anecoica

Sono state realizzate per i piani principali solo per la Co polarizzazionione. Si è dapprima eseguita una misura sul solo piano H (Plot 26) a una distanza Tx-Rx confrontabile con quella adoperata per i sub-array. Questo al fine di stimare, almeno in modo approssimativo, l'incremento di direttività dell'array.
In realtà il valore di potenza assoluta misurata è solo indicativo, dato che si è verificato dipendere fortemente dall'allineamento fine dell'array. La misura sembra dipendere in particolar modo dalla orientazione nel piano perpendicolare all'array , fortemente condizionata dal peso dell'array stesso . Si pè cercato di ottimizzare la sua orientazione massimizzando la potenza ricevuta . Come si può vedere dal Plot 29 (che mostra l'andamento in banda della potenza Max sui piani E ed H), in realtà questa ottimizzazione è comunque approssimativa e l'incertezza associata alla determinazione (e alla ripetibilità della misura) della potenza Max del lobo principale è quantificabile in 3-5 dB) .

Tuttavia, pur con questi limiti, il confronto tra il caso di subarray e l'array indica un incremento di direttività di circa 14 dB. Il confronto analitico tra il caso 2^2 elementi e 2^8 elementi dovrebbe invece prevedere un incremento di 18 dB; se tuttavia si considerano le incertezze di cui sopra legate alla misura, il risultato sperimentale sembra ragionevole.
Successivamente la distanza tra Tx ed Rx è stata aumentata a 3 m e si sono eseguite le misure di Co e X-pol su entrambi i pianei E ed H (Plot 27, Plot 28)

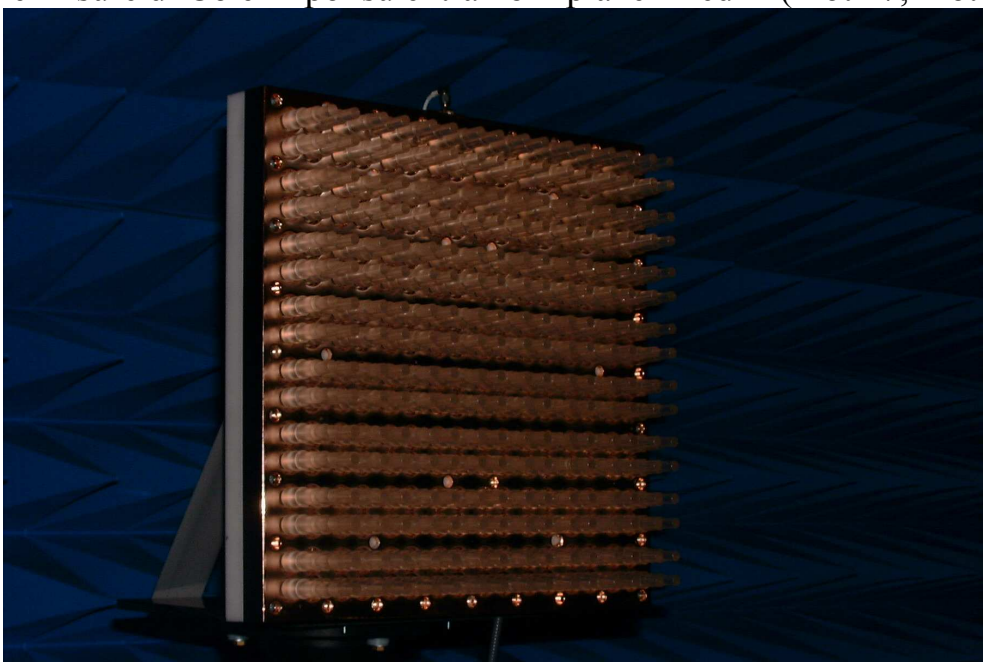
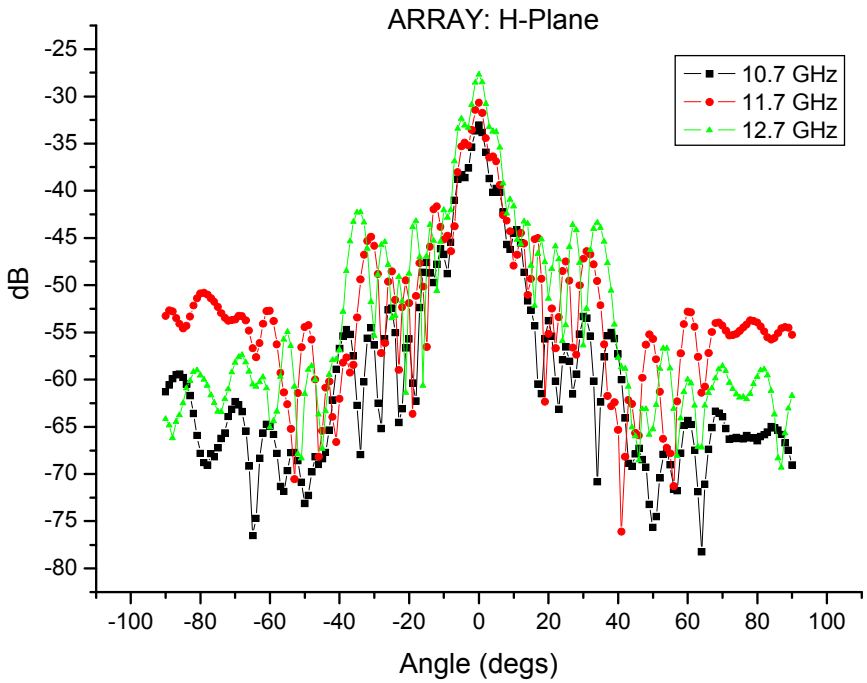
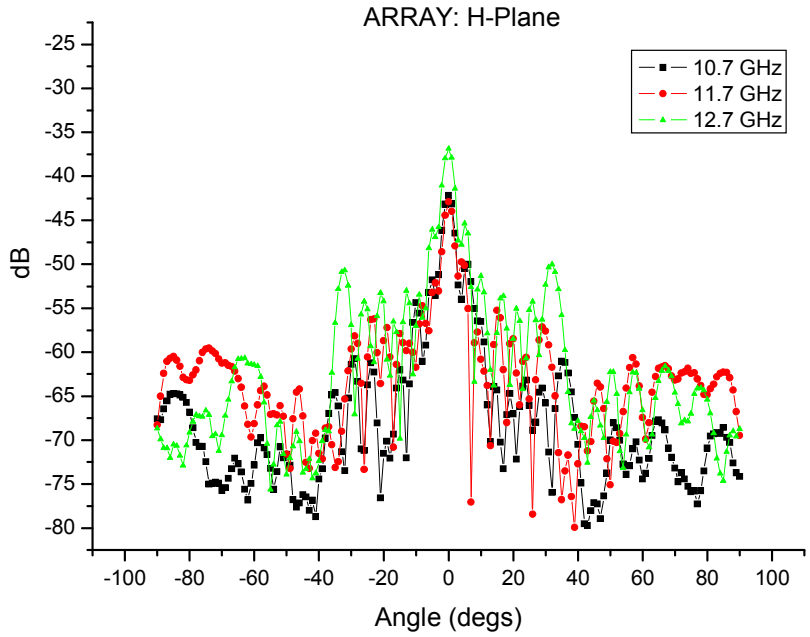


Figura 42 planar array durante la misura di pattern in camera anecoica

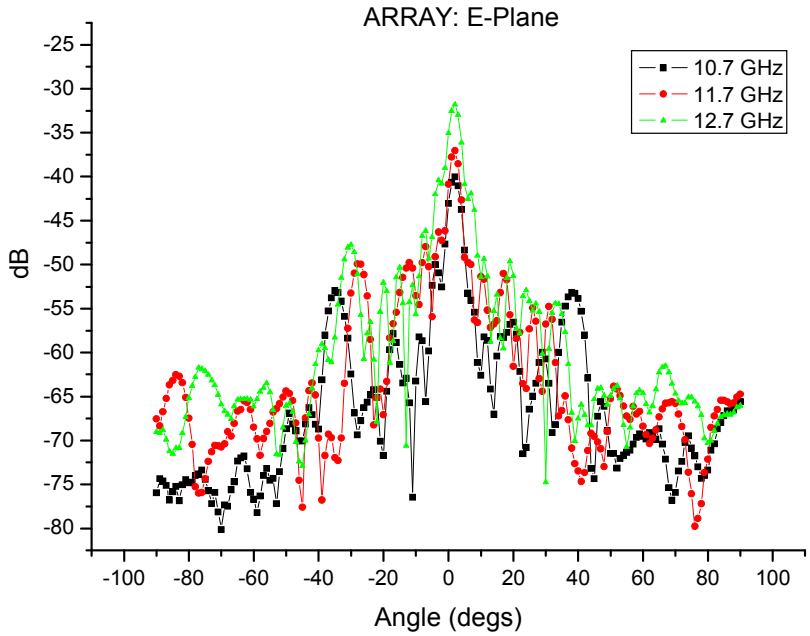
Figura 43 setup delle misure di pattern



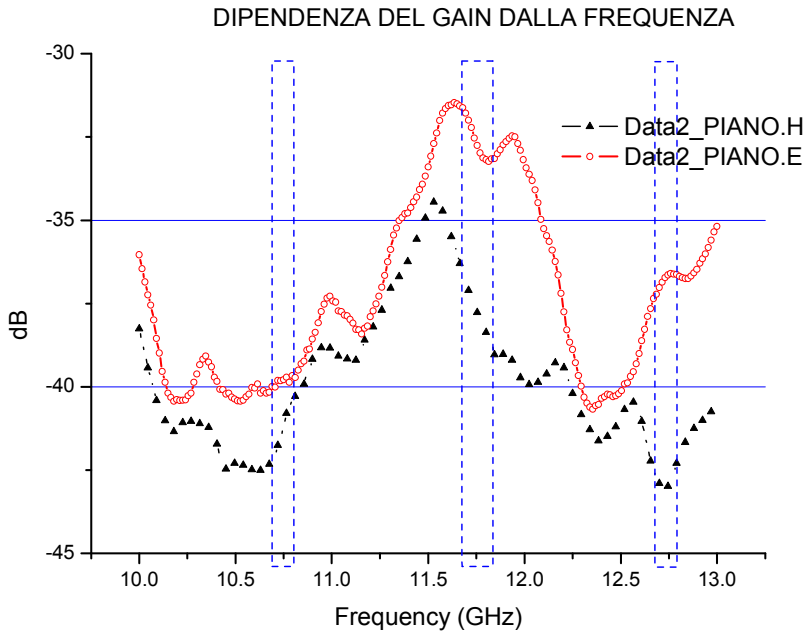
Plot 26 piano H a d = 120 cm



Plot 27 Piano H a d = 300 cm



Plot 28 Piano E a d = 300 cm



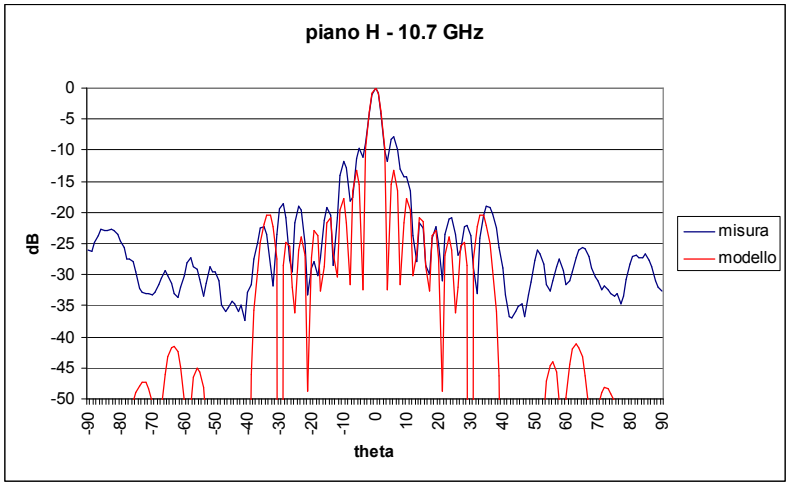
Plot 29 dipendenza della potenza max ricevuta dalla frequenza

8.4 Confronto col modello

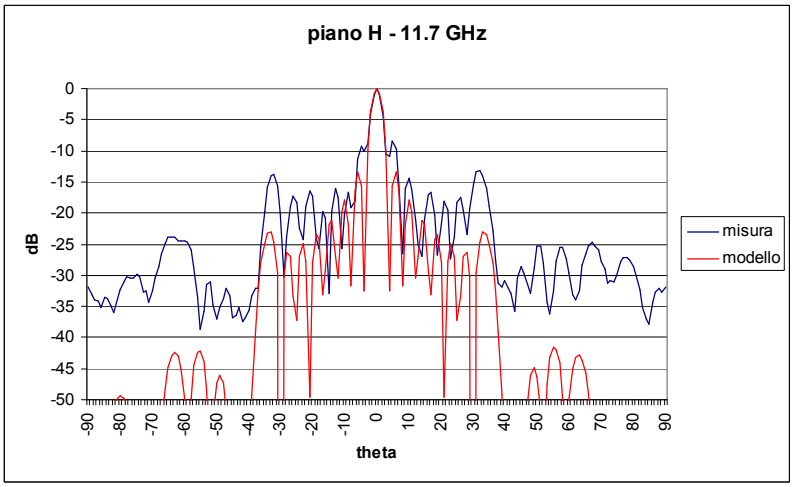
Nei plot a seguire viene proposto il confronto tra la predizione teorica di un modello analitico che tiene conto del pattern simulato di per un elemento radiante singolo (singolo Goodundo) e lo propaga alla matrice completa di 256 elementi. In realtà questo approccio è piuttosto semplificativo del problema dato che :

- si sta considerando una distribuzione di potenza e una fase comune per tutti gli elementi dell'array lungo la linea di alimentazione che è puramente teorica
- non si tiene conto del mutuo accoppiamento meccanico (copertura) tra gli elementi dell'array

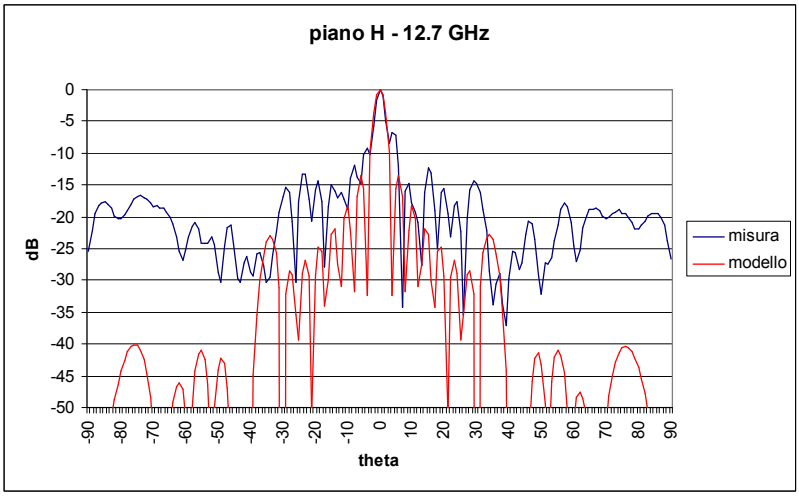
Il risultato del confronto mostra un discreto accordo tra modello e misura nella riproduzione del lobo principale. I livello dei lobi secondari primi vicini è forse sottostimato dal modello che non tiene conto di effetti di misura come ad esempio lo scattering di radiazione sulle antenne e la distanza tra Tx ed Rx inferiore a quella teoricamente richiesta per realizzare una misura di radiazione (il posizionamento relativo delle due antenne è una conseguenza dei bassi livelli di potenza coinvolti nella misura).



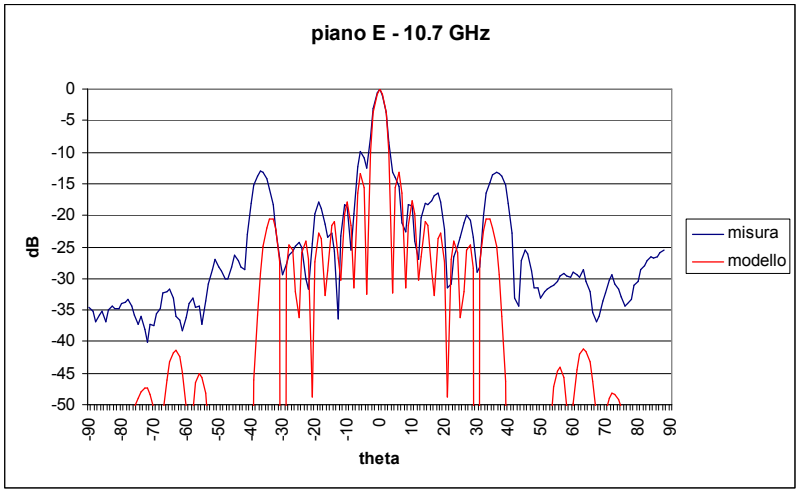
Plot 30



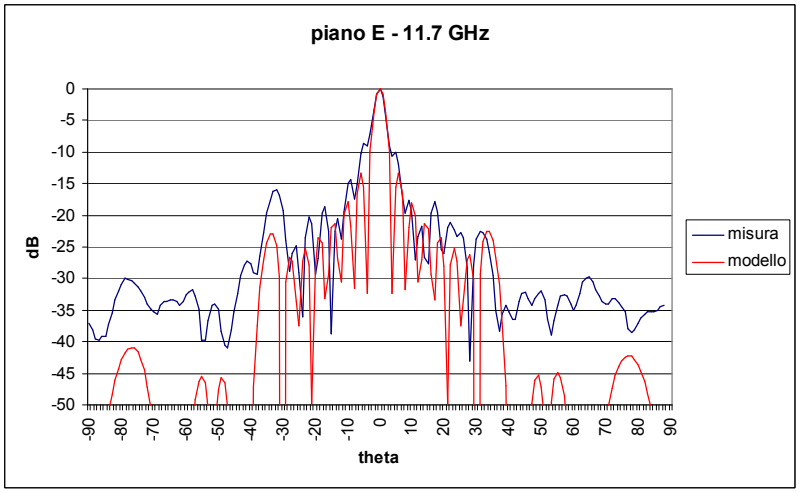
Plot 31



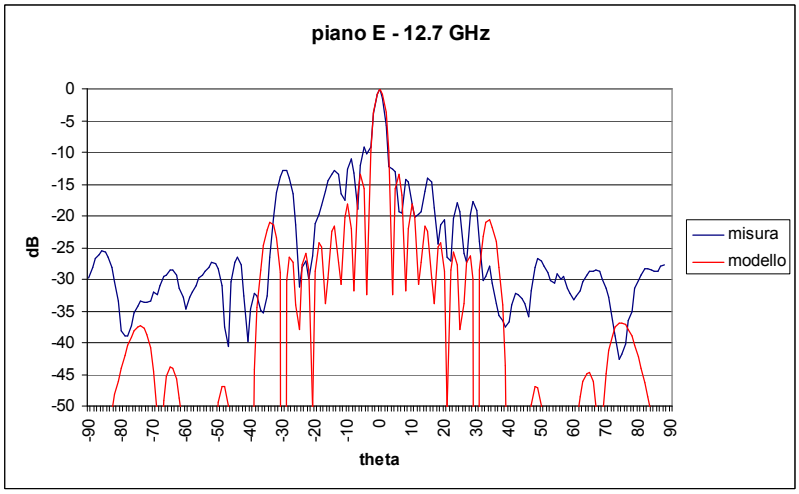
Plot 32



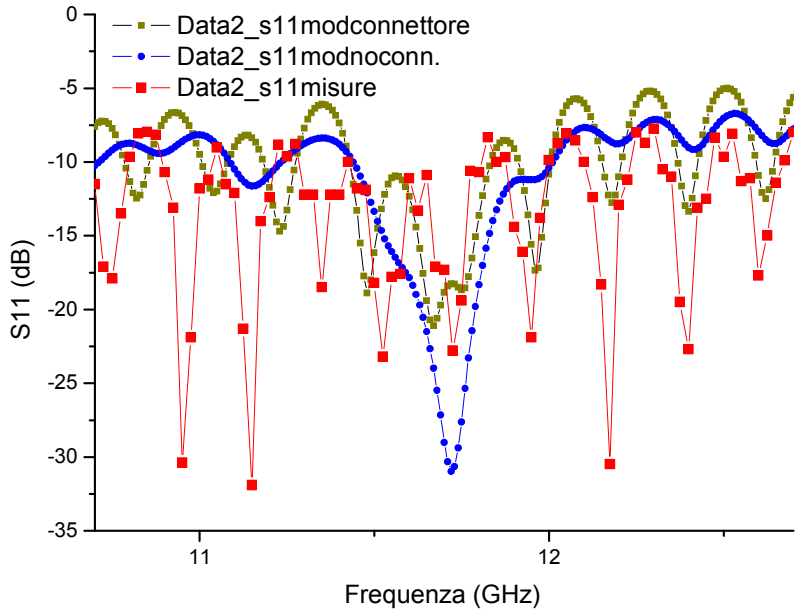
Plot 33



Plot 34



Plot 35



Plot 36 confronto tra l' S11 misurato (rosso) e due modelli che tengono conto rispettivamente di un caso ideale in cui il connettore è perfettamente adattato alla linea e del caso modellato in AD5 in cui il connettore è supposto inserire un effetto capacitivo.

Il modello di non idealità della transizione connettore- microstriscia dà in qualche modo conto del return loss misurato, come mostrato nel plot sopra: la misura , come si può vedere, si pone ad un livello intermedio tra il caso modellato e quello ideale.
Vista l'entità dell'impatto di questo problema, e dato che è di natura comune a molte altre applicazioni che esulano anche da questo bando, riteniamo che questo aspetto meriterebbe uno studio approfondito a sé stante.

9 ANALISI DEL RISULTATO & OPEN ISSUES

Il progetto di questo bando è stato lungo ed elaborato , in termini di hardware realizzato e problematiche affrontate per arrivare alla realizzazione dell'array finale. La maggiore novità rispetto al Bando 2005 consiste nell'aver abbandonato design e tecniche costruttive convenzionali in favore di una maggiore sperimentazione dei materiali e del disegno elettromagnetico. L'uso dei materiali plastici e del processo di sputtering metallico ha consentito , a parità di costi (che sono comunque ancora da intendersi riferiti a un oggetto 'prototipo') rispetto al bando precedente, di realizzare un numero di gran lunga superiore di elementi radianti e di test di avvicinamento al prodotto finale.
LA stessa rete di alimentazione, disegnata in modo da rendere indipendente il design dell'array dalla presenza dei singoli lanciatori (che avevano richiesto tecniche di elettroformatura per la loro realizzazione) è il frutto di un lungo lavoro di ricerca e di sperimentazione.
La realizzazione dell'array ha comportato uno sforzo consistente in termini di modellistica.
L'oggetto realizzato è funzionante e sufficientemente in accordo con le aspettative.
Il bando si proponeva in origine di arrivare alla ingegnerizzazione di un array rappresentativo di una parabola commerciale in termini di performance. Questo risultato è solo stato parzialmente ottenuto , dato che l'array di 256 elementi è acnora lontano dall 'essere un prodotto commercializzabile. Questo perché i tempi del bando (1 anno) non sono stati sufficienti , vista anche l' entità delle problematiche affrontate, e perché i costi di gestione del progetto sono stati interamente assorbiti dal pagamento delle spese vive di produzione (materiali e realizzazioni meccaniche) senza margine per adibire una parte di esse alla stipula di un qualche contratto di collaborazione con personale in grado di lavorare full-time. Il personale coinvolto è interamente rappresentato da personale con contratti a progetto o a tempo determinato pagati su altri progetti. Il possibile sviluppo di questo progetto nella direzione di un prodotto ingegnerizzato finito richiederebbe probabilmente una consistenza del finanziamento di altro livello, tale da consentire l'attivazione di almeno un paio di contratti specifici.
L'oggetto prodotto è comunque una buona base di partenza per la realizzazione di quanto sopra, avendo dimostrato che l'utilizzo dei materiali dielettrici e delle tecniche di metallizzazione, accoppiato a una accurata modellistica elettromagnetica e allo studio di dettaglio delle proprietà elettromagnetiche dei materiali adoperati, potrebbe fornire prestazioni confrontabili con quelle dei materiali di uso convenzionale. Lo stesso design elettromagnetico, pur essendo

ancora lontano dalle prestazioni dei dispositivi standard di impiego commerciale in campo di ricezione satellitare, nei casi di specie (cioè in cui la caratteristica principale del prodotto siano il limitato impatto ambientale e la semplicità dell'installazione) , sembra avere comunque ampi margini di miglioramento nel caso in cui si volesse proseguire sulla strada tracciata.

10 APPENDICE 1 : DISEGNI MECCANICI

10.1 SUB-ARRAY 2 elementi con alimentazione in guida d'onda

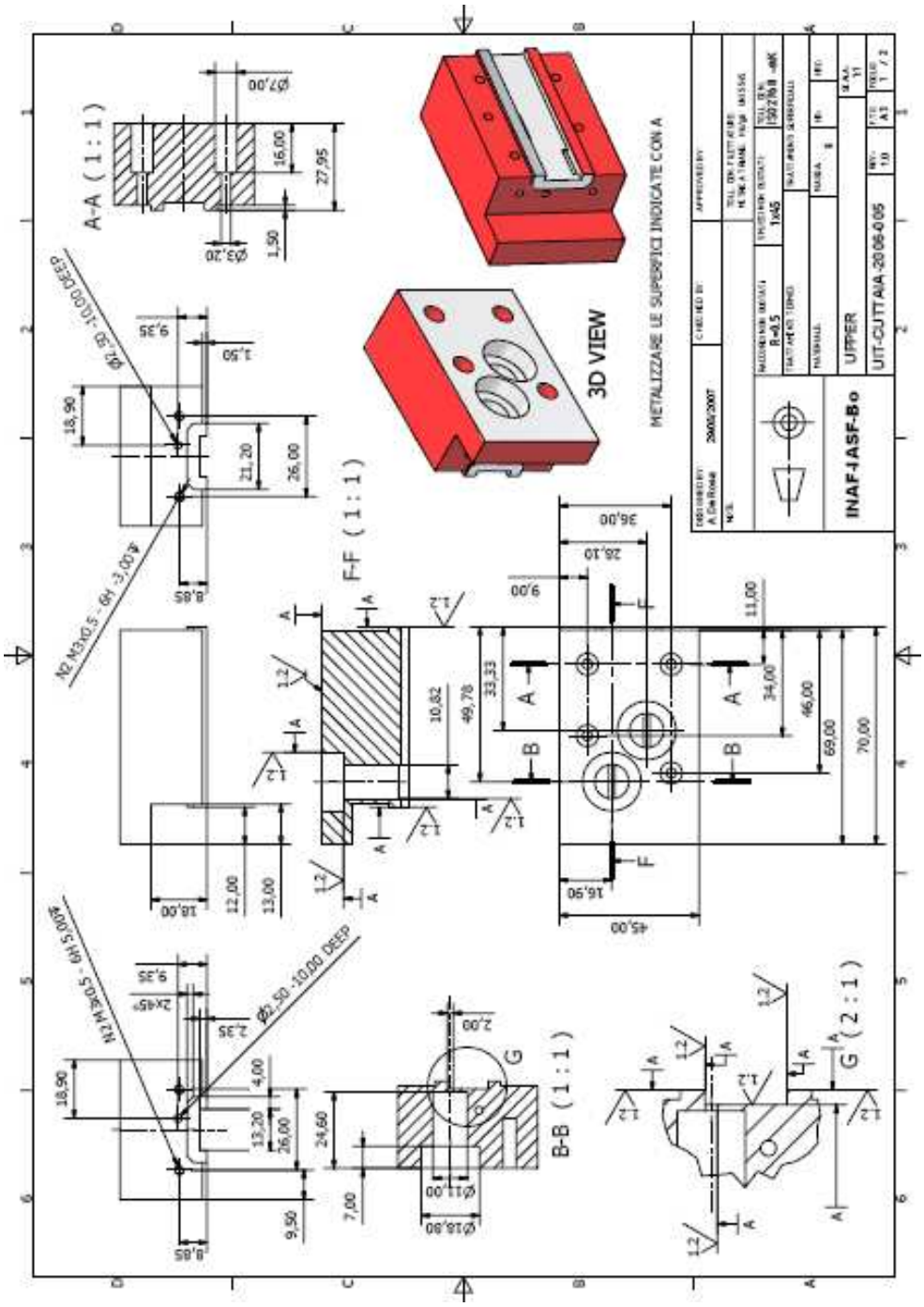


Figura 44 parte superiore: visibile il choke che alloggia le antenne dielettriche e la guida d'onda ridged slotted

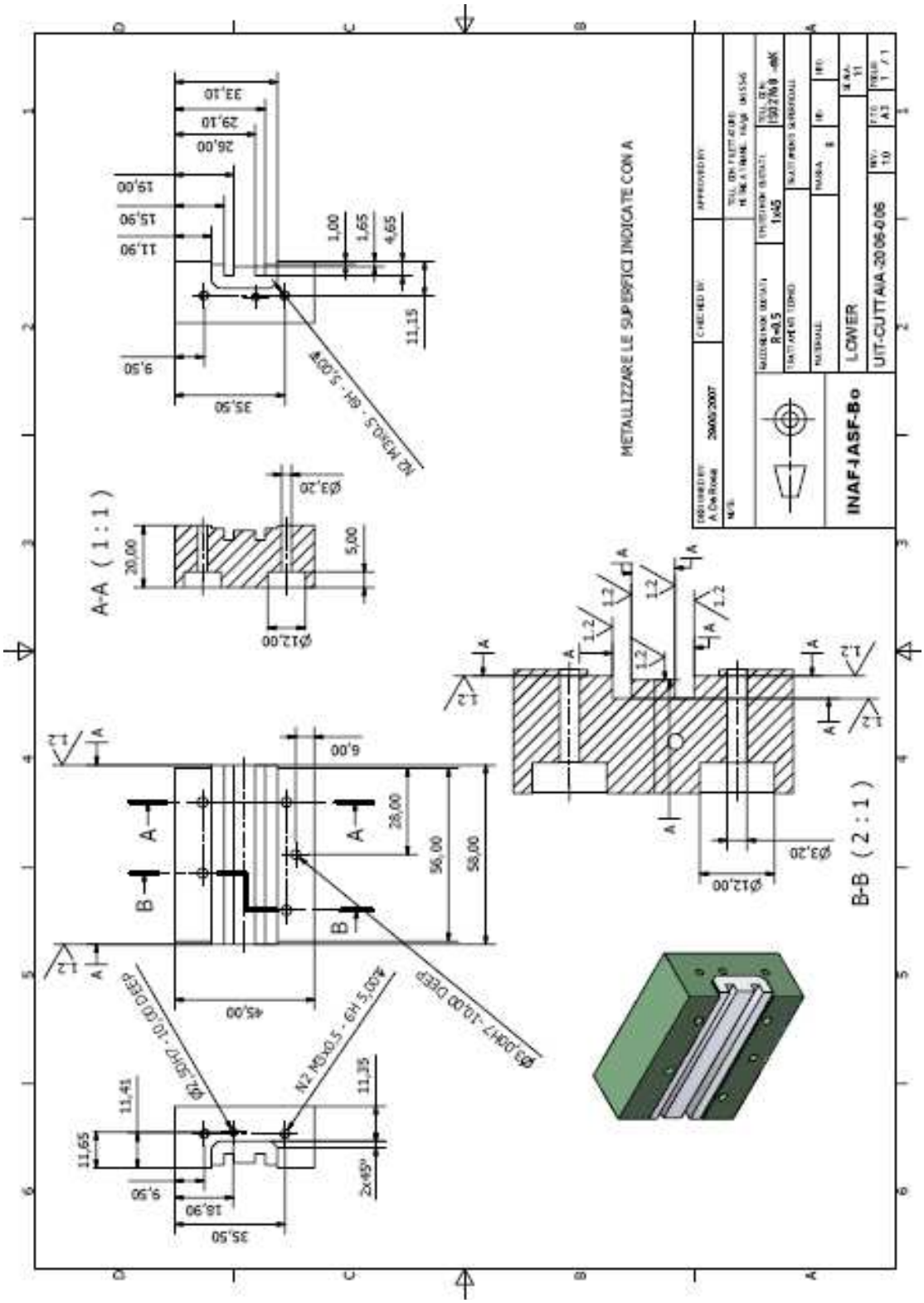


Figura 45 parte inferiore

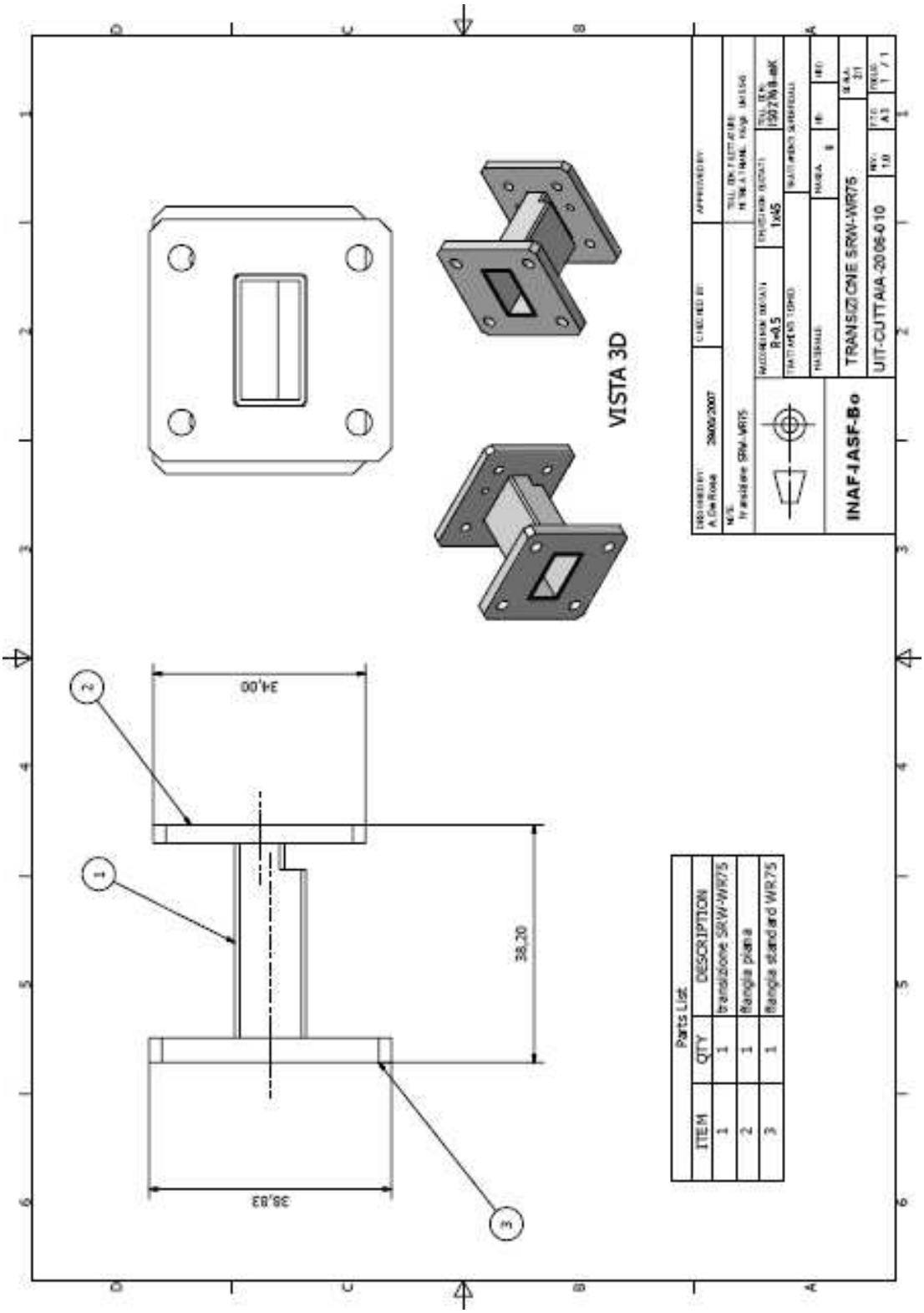


Figura 46 Trasformatore

10.2 SUB-ARRAY 4 elementi con alimentazione in microstriscia

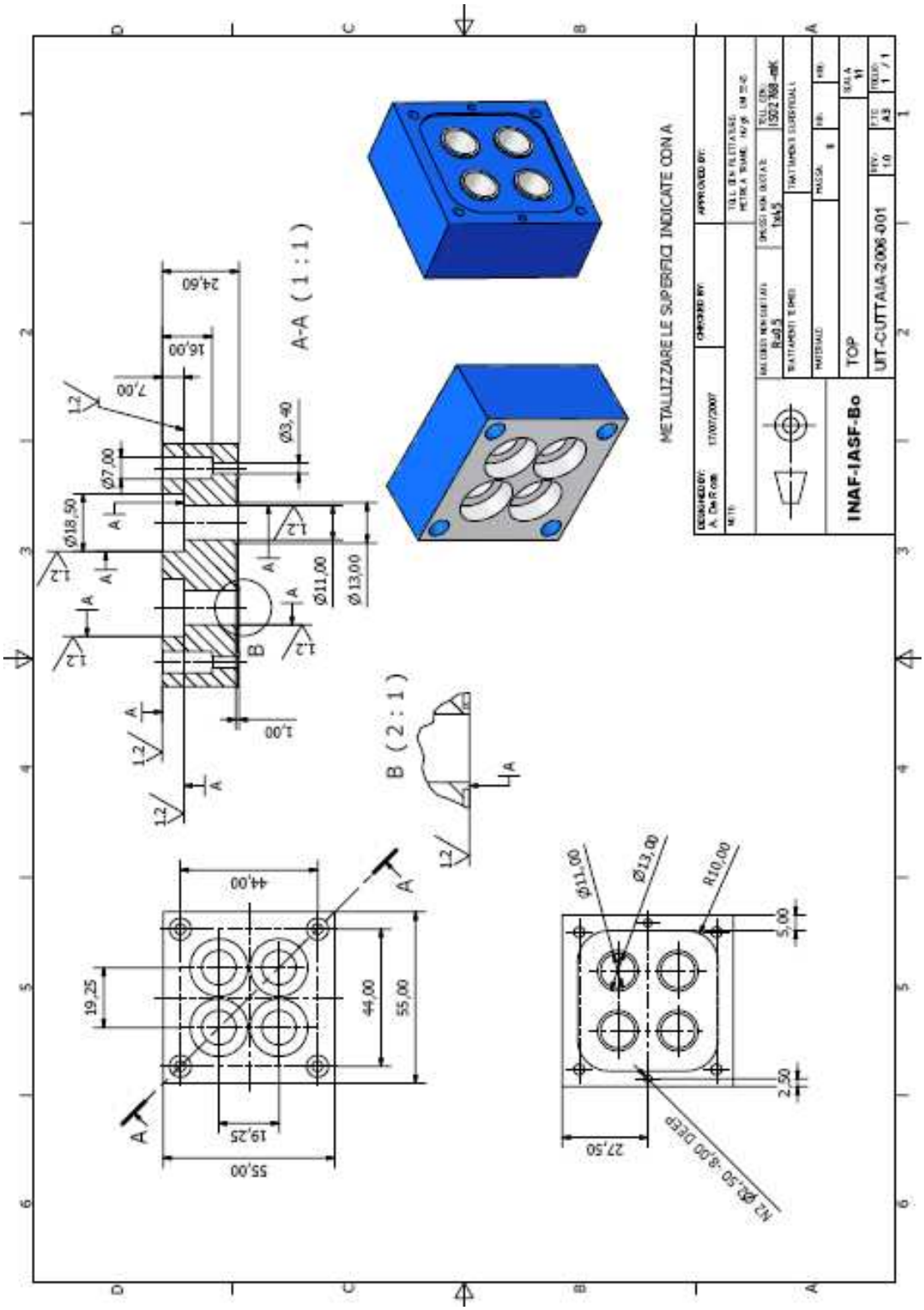


Figura 47 parte superiore: in vista il piano ground con i 4 choke che alloggiano le antenne dielettriche.

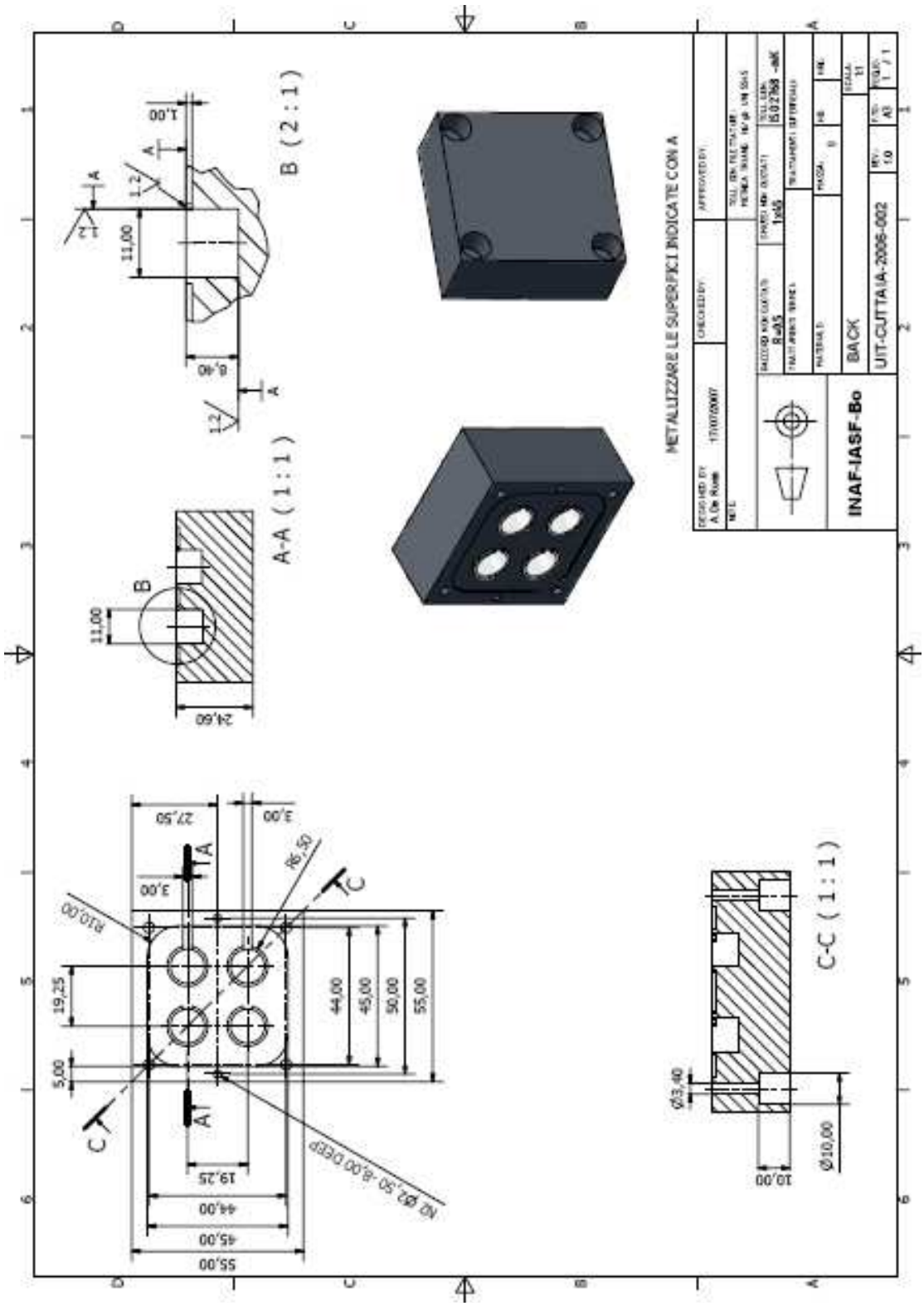


Figura 48 parte inferiore: sono visibili i bicchieri metallizzati descritti in 4.2.1

10.3 ARRAY COMPLETO

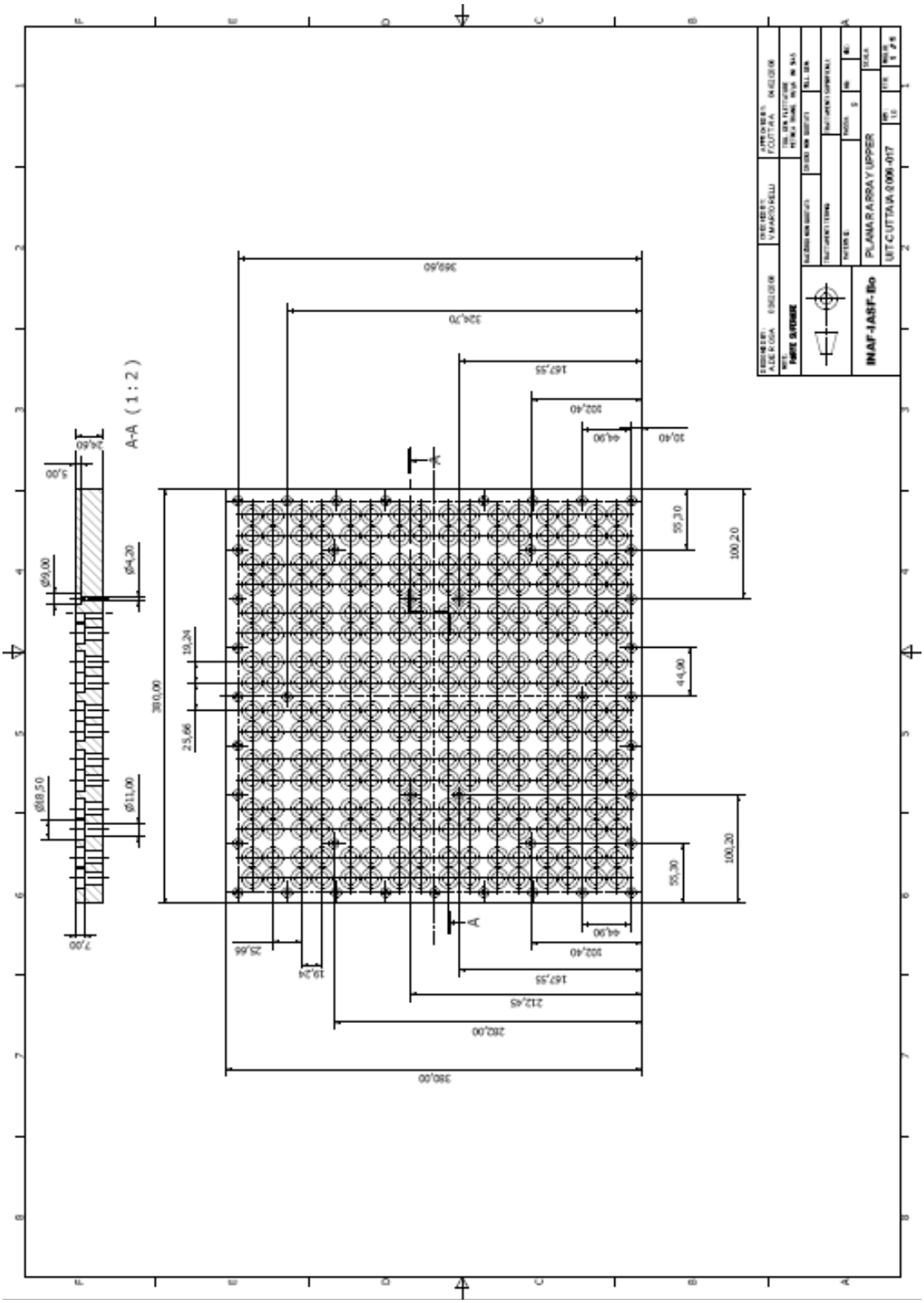


Figura 49

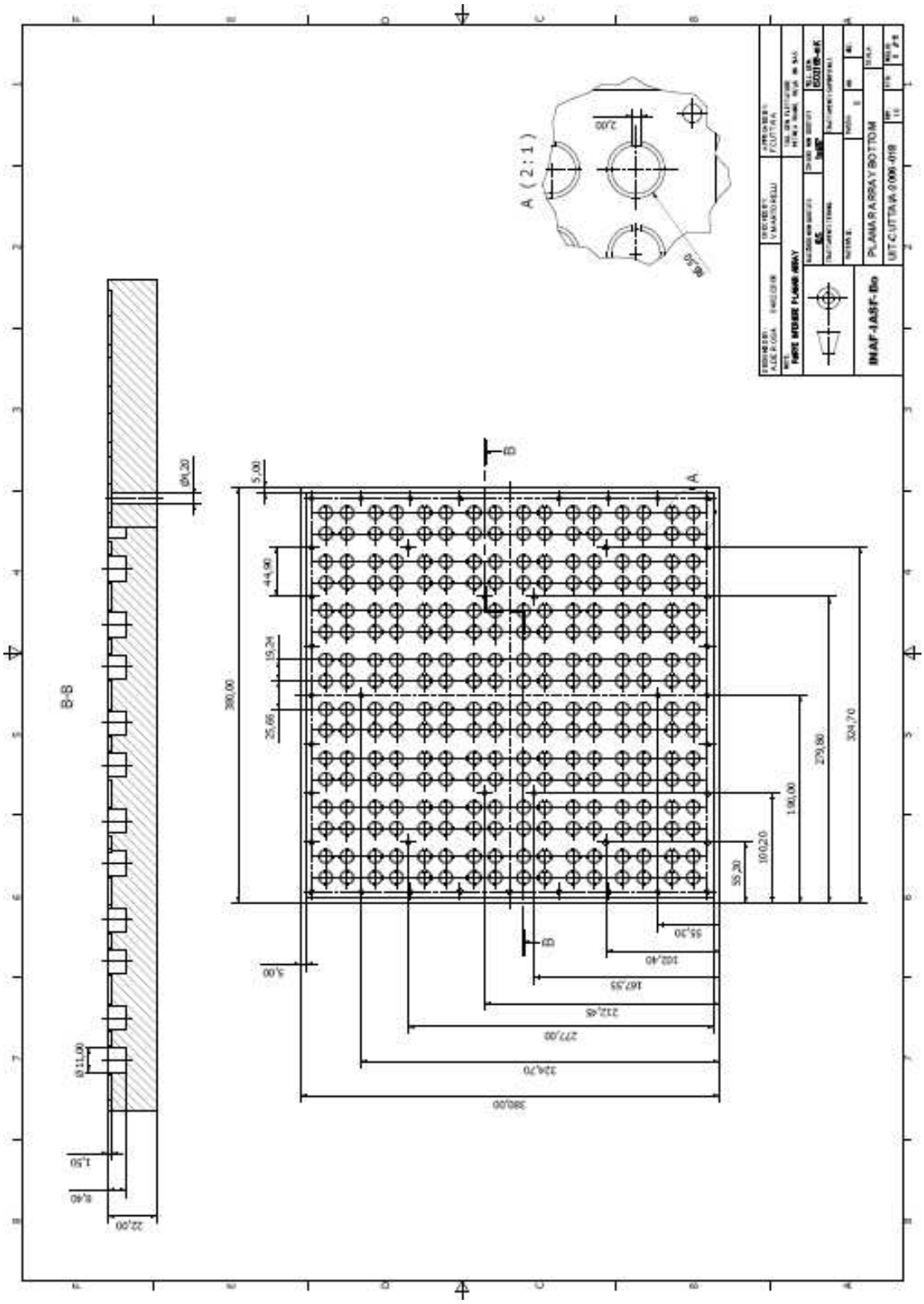


Figura 50

11 APPENDICE 2: Rapporto di test preliminare su parti A1 e B1 sottoposte a Sputtering (30-10-2007)

Eseguita ispezione ottica a occhio nudo
Eseguita misura elettrica con multimetro digitale
Eseguita ispezione con microscopio elettronico
Eseguita qualche prova di asportazione del materiale a mano nuda o attraverso uso di utensili metallici diversamente graffianti.

Dalle info in nostro possesso i campioni si differenziano come segue:

* viene successivamente indicata come A la serie prodotta in RP e come B la serie prodotta in Derlin con processo di lavorazione meccanica.

Sottoposti a sputtering in assenza di verniciatura
parti MS1 – A , MS1 – B
parti MS2 – A , MS2 – B

Sottoposti a sputtering successivamente a verniciatura
parti WG1 – A , WG1 – B
parti WG2 – A , WG2 – B

11.1 Ispezione visiva :

11.1.1 Pezzi non sottoposti a verniciatura :

serie A:
MS1: il metallo è mal deposto sulla faccia superiore e mostra zone di mancato riempimento. All'interno dei bicchieri è simile. Il materiale non è asportabile al contatto con il dito.

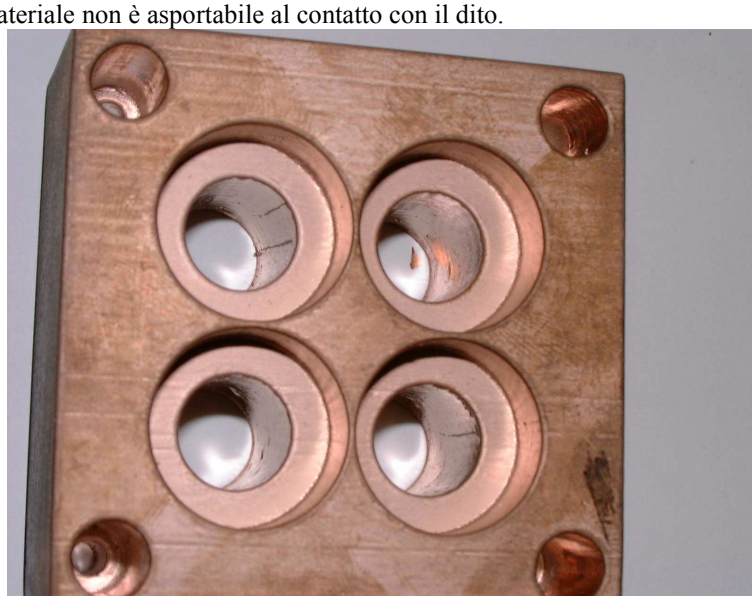


Figura 51

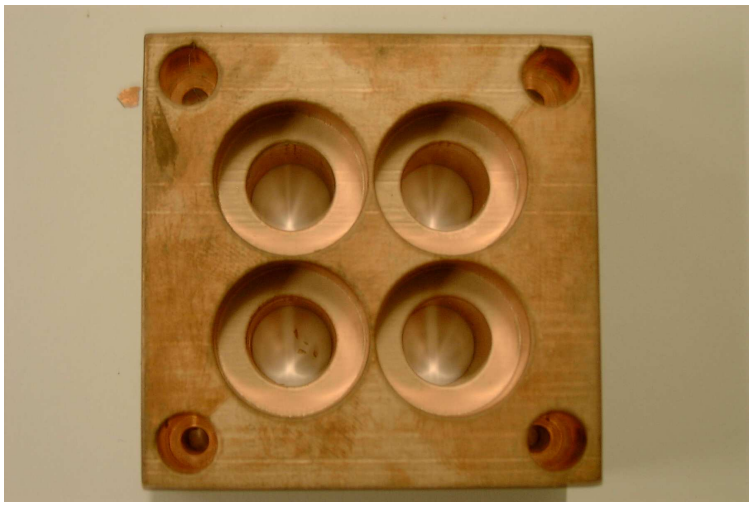


Figura 52

MS2 :
Il metallo è deposto in modo disomogeneo all'interno del cilindro ; alcune regioni del collarino risultano scoperte

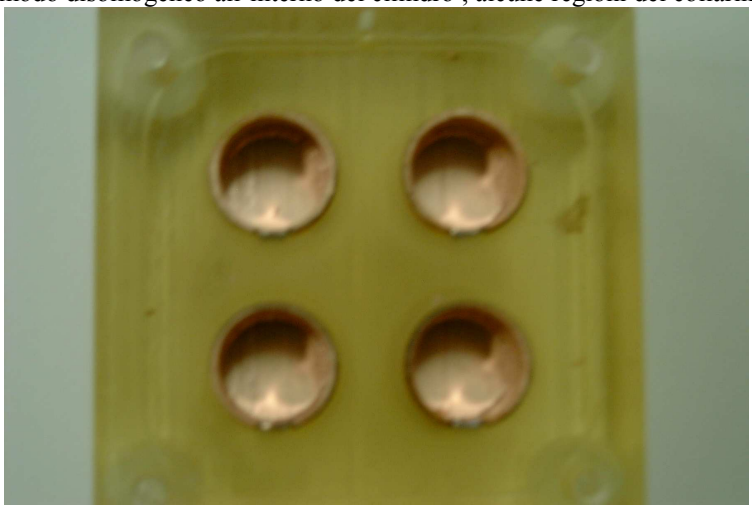


Figura 53

Serie B

MS1: il materiale si esfolia semplicemente al passaggio del dito. La maggior parte del piano frontale è scoperta. L'interno dei bicchieri si presenta tuttavia abbastanza liscio

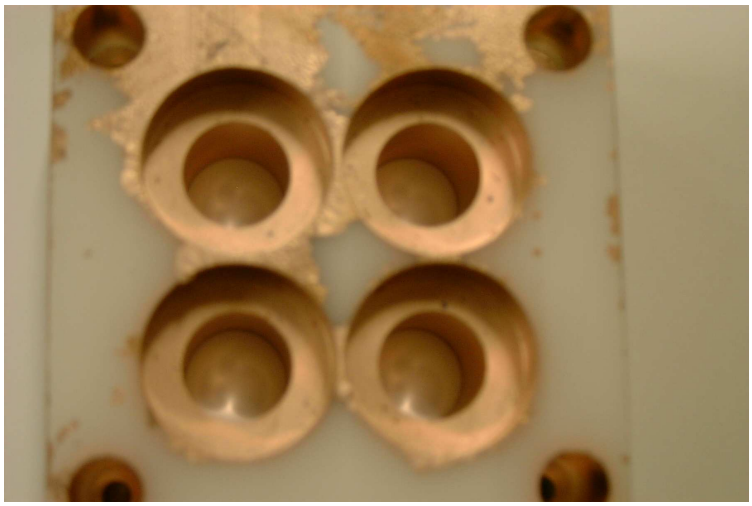


Figura 54

MS2:
Il cilindro appare abbastanza coperto, compresa la regione del collarino. Delle strane macchie simili a bruciature sono presenti intorno alle aperture.

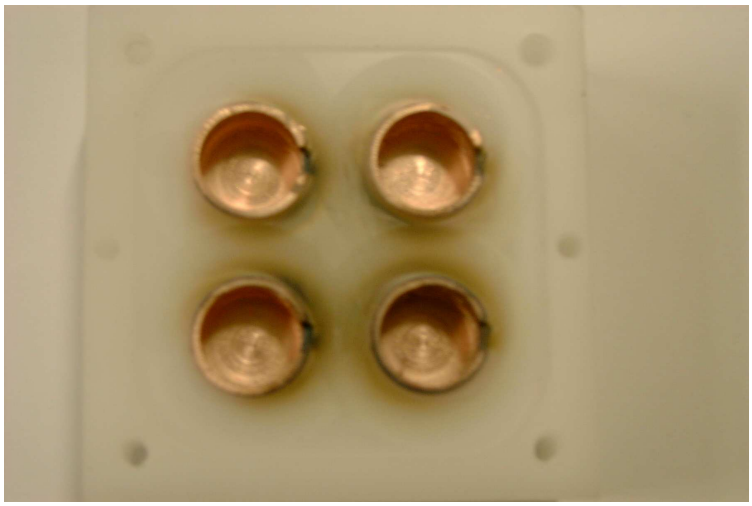
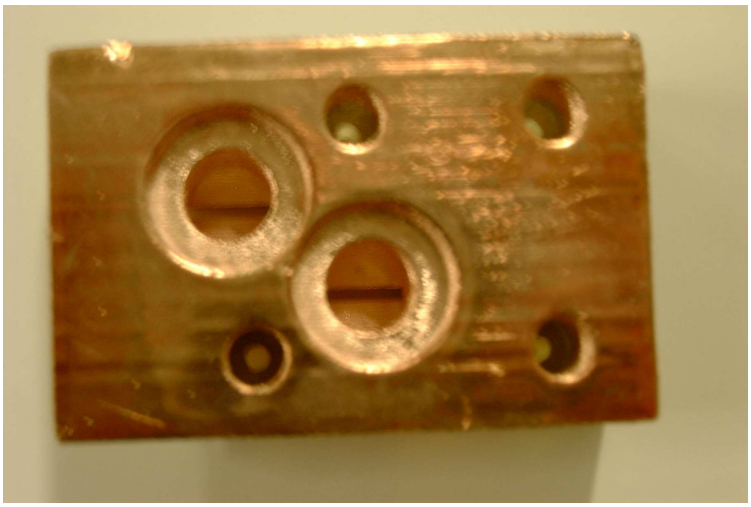


Figura 55

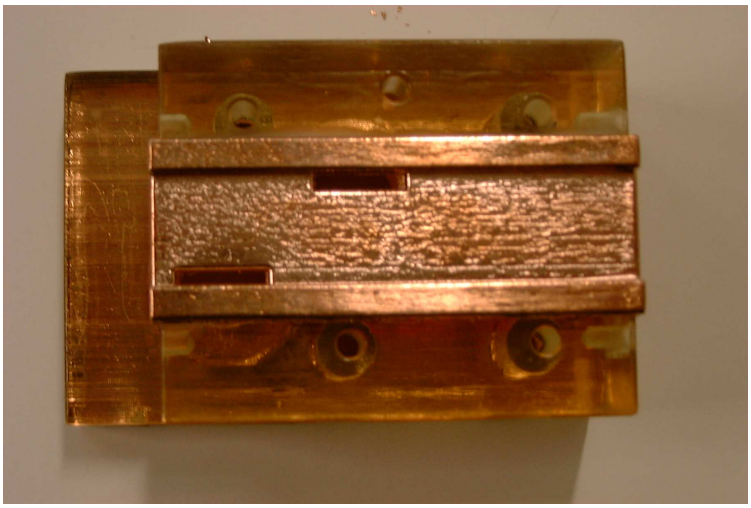
11.1.2 Pezzi sottoposti a trattamento di verniciatura aggrappante:

serie A:

WG1 la deposizione risulta molto rugosa sia sulla superficie frontale che all'interno dei bicchieri. Ci sono delle zone dei bicchieri sistematicamente 'in ombra' rispetto alle altre.



WG2 : la guida è ben coperta; l'effetto è tuttavia quello di una superficie butterata.



serie B:
WG1 la deposizione risulta abbastanza liscia sulla superficie frontale e all'interno dei bicchieri.
Evidente qualche regione di scopertura (esfoliazione) , forse dovuta alla rimozione del taper.
Si notano delle zone delle gocce al di sotto del rame , dovute forse alla verniciatura. Si notano disomogeneità nella colorazione e zone d'ombra all'interno dei bicchieri.

Figura 56

La parte inferiore (binario) si presenta ben coperta ma al contempo butterata.

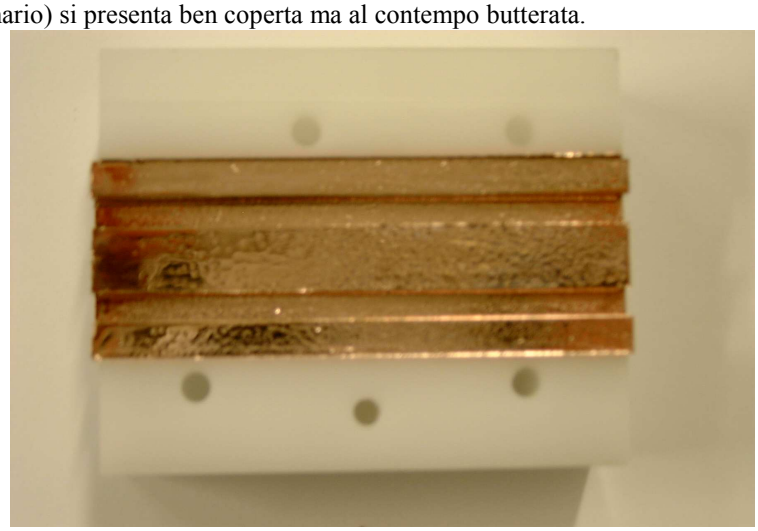


Figura 57

WG2
Buona copertura, come la parte inferiore di WG1, tuttavia anche in questo caso la superficie risulta essere butterata, anche se la grana parrebbe un po' più fine. La resistenza meccanica sembra discreta.

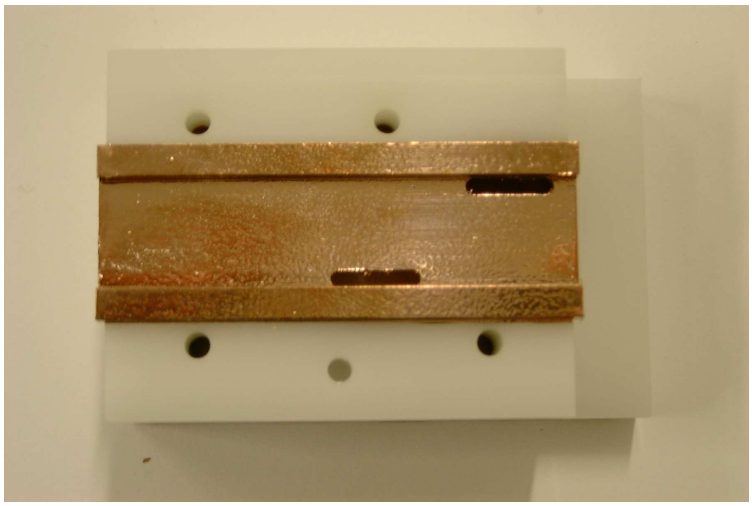


Figura 58

11.2 Misura di resistenza :

Una semplice misura di resistenza attraverso un multimetro è stata eseguita per verificare l'esistenza di possibili interruzioni del contatto elettrico su tutti i pezzi, in punti specifici.
Il risultato generale è che i pezzi di tipo B non presentano anomalie macroscopiche (resistenze superiori all' Ohm). Dal discorso iene ovviamente escluso il calcolo della resistenza R3 sul pezzo Wg1-B1 di Figura 54.
I pezzi di tipo A si mostrano confrontabili con quelli di tipo B per ciò che riguarda le resistenze misurate nei binari delle parti WG1 (R1) e WG2 (R2) e dei pezzi MS2 (R5). Mostrano invece una elevata resistenza all'interno dei bicchieri- (R4) (che già alla vista mostrano superfici molto scabre, come già precedentemente evidenziato), non riscontrata invece nei pezzi di tipo B. Le misure elettriche risultano ripetibili su parti omologhe di tipo A e di tipo B. Segue una rappresentazione grafica dei punti corrispondenti alla localizzazione dei terminali del tester.

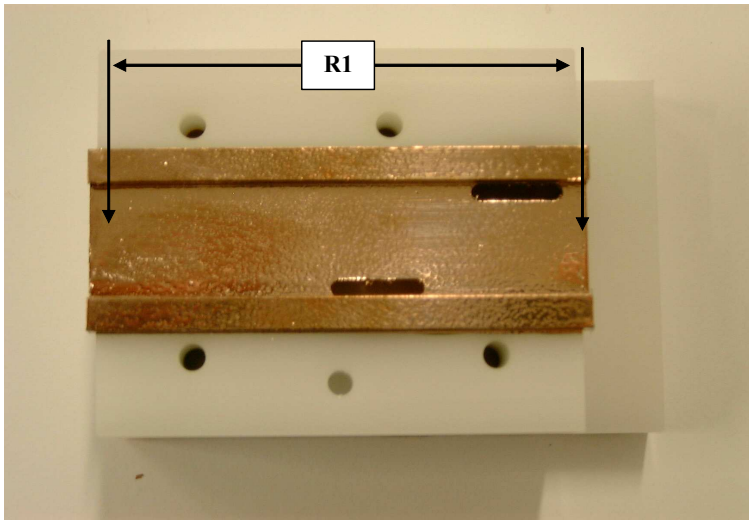


Figura 59

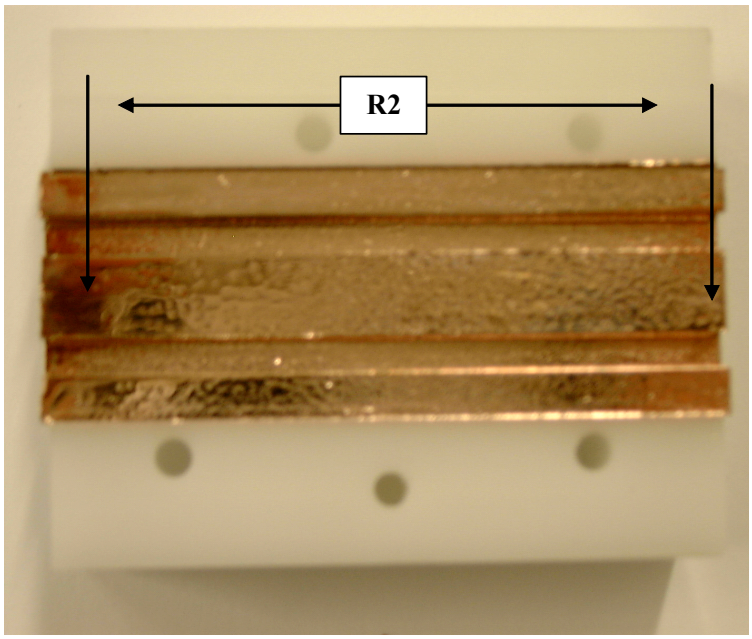


Figura 60

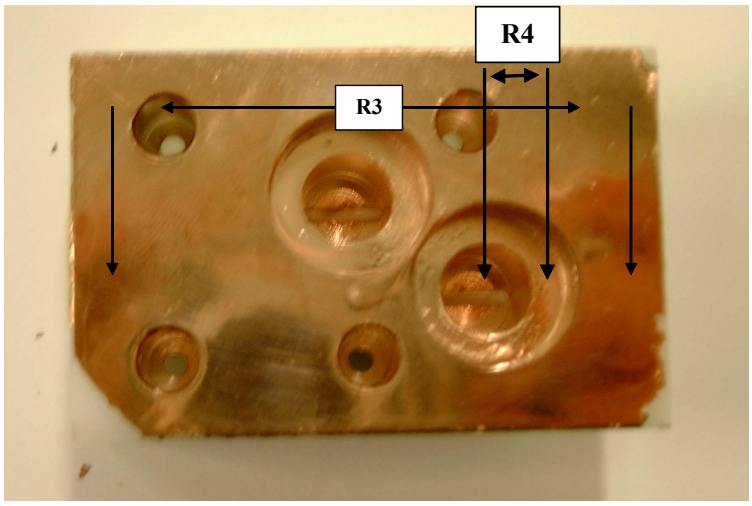


Figura 61

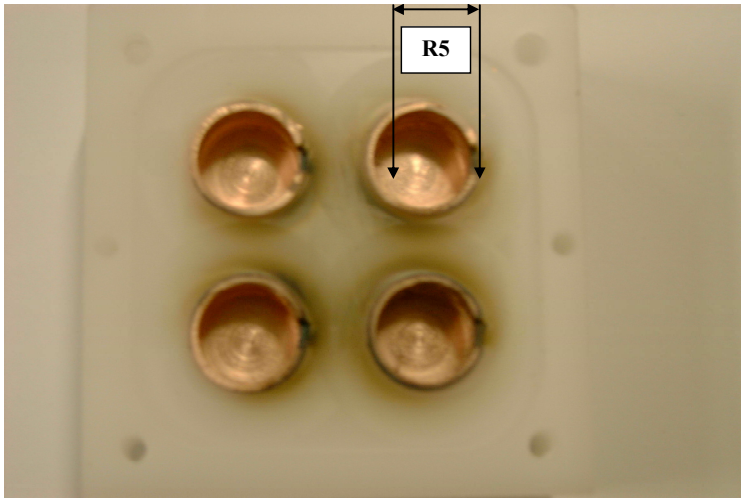


Figura 62

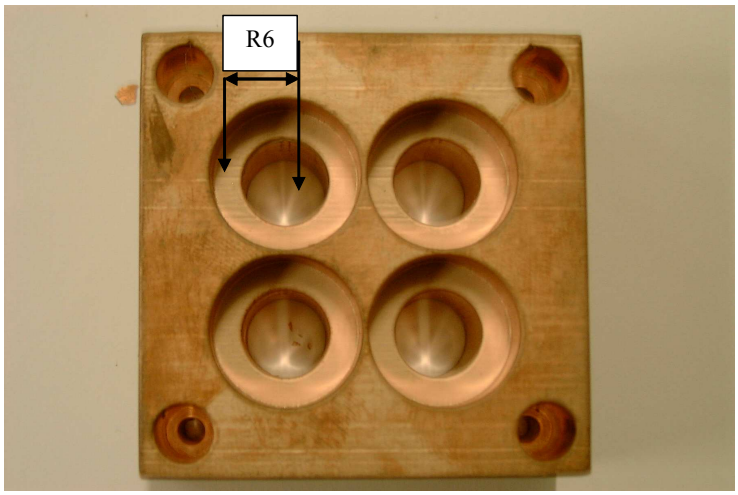


Figura 63

	A (Ohm)	B (Ohm)
R1	0.3	0.3
R2	0.3	0.3
R3	0.3	0.3
R4	67.0 variabile lungo l'asse (18.0 a circa 1/3 dell'altezza dalla base)	1.2
R5	0.2-0.5	0.6-2
R6	0.3	0.5

Tabella 1

11.3 Ispezione al microscopio elettronico :

Si nota un accrescimento irregolare all'interno dei bicchieri MS1-A (resina) : la crescita presenta una formazione di creste e valli e il materiale sembra addensarsi maggiormente attorno alle creste.
La superficie interna dei bicchieri è strutturalmente diversa da quella della faccia superiore dei pezzi (che invece si mostra abbastanza regolare).

11.4 Commenti:

Entrambe le serie sono ancora lontane da un risultato soddisfacente, sia dal punto di vista meccanico (aderenza del materiale e controllo dell'omogeneità di lavorazione) che elettrico.
Si osserva una discreta aderenza del materiale nelle serie verniciate.
La verniciatura sembra tuttavia creare dei problemi di deposizione del materiale nei pezzi in resina (A), soprattutto all'interno dei bicchieri. Questo non è riscontrato in assenza di verniciatura. Questa scabrosità superficiale determina alti valori di resistenza, dovuta probabilmente non tanto alla porosità in se' quanto piuttosto alla mancanza di una buona connessione elettrica tra i vari strati di deposizione, lungo la direzione assiale dei bicchieri. Questo è osservato abbastanza bene anche al microscopio.
I pezzi WG sembrano non risentire dell'effetto della verniciatura, presentando tanto nelle lavorazioni A in resina e B in Derling una discreta adesione superficiale e superfici abbastanza lisce (anche se leggermente butterate) alle quali fanno riscontro discreti valori di resistenza.

Domande:

1) cosa causa l'effetto 'buccia d'arancia'?
2) cosa causa l'effetto di zigrinatura riscontrato nei pezzi MS1 A , soprattutto all'interno dei bicchieri? Perché lo stesso effetto non è presente nei pezzi di tipo WG1-A all'interno dei bicchieri (che pure hanno stessa profondità)?
3) Come è stata stesa la vernice aggrappante ? è possibile un miglior controllo del processo?
4) I pezzi sono stati sottoposti a riscaldamenti tali da produrre bruciature nel materiale? Diversamente, cosa ha creato le macchie intorno ai cilindri nei pezzi MS2-B?
5) Quanto è stato il tempo di posa?
6) Sono state fatte riprese successive del processo di sputtering sugli stessi pezzi?
7) I pezzi omologhi A e B son stati lavorati simultaneamente e in posizioni corrispondenti?

Come caratteristiche per la produzione successiva si richiede :

a) una omogenea copertura delle parti da sottoporre a sputtering
b) una buona adesione superficiale (tale da non consentire l'asportazione del metallo solo al contatto con un utensile senza applicare pressione)
c) resistenze misurate inferiori a 1 Ohm