



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Studio per la progettazione e realizzazione di schermi elettromagnetici trasparenti



RAPPORTI



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Studio per la progettazione e realizzazione di schermi elettromagnetici trasparenti

Rapporti 109/2010

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.it

ISPRA, Rapporti 109/2010

ISBN 978-88-448-0431-2

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: Paolo Orlandi

Coordinamento tipografico:

Daria Mazzella

ISPRA - Settore Editoria

Amministrazione:

Olimpia Girolamo

ISPRA - Settore Editoria

Distribuzione:

Michelina Porcarelli

ISPRA - Settore Editoria

Impaginazione e Stampa

Tipolitografia CSR - Via di Pietralata, 157 - 00158 Roma

Tel. 064182113 (r.a.) - Fax 064506671

Finito di stampare maggio 2010

Autori

Ing. Salvatore Curcuruto*

Prof. Marcello D'Amore**

Prof.ssa Maria Sabrina Sarto**

Ing. Giuseppe Marsico*

Ing. Sandra Greco**

Ing. Domenico Alessandro Lampasi**

Ing. Alessio Tamburrano**

*ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

**CNIS – Centro di Ricerca per le Nanotecnologie applicate all'Ingegneria della Sapienza

INDICE

PREFAZIONE	9
-------------------------	---

RAPPORTO ATTIVITÀ A

INTRODUZIONE	11
1. SORGENTI DI CAMPO ELETTROMAGNETICO A RADIOFREQUENZA	11
2. PREDIZIONE DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO A RADIO FREQUENZA ...	12
2.1 Metodi di calcolo	12
2.2 Metodologie per la verifica del rispetto dei limiti di campo	13
3. LIVELLI CRITICI DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO A RADIOFREQUENZA INCIDENTE SU EDIFICI IN AMBIENTE URBANO	13
3.1 Analisi di coperture macrocellulari e microcellulari per telefonia mobile	13
3.2 Rilievi sperimentali	14
3.3 Simulazione numeriche di una tipica situazione “hot spot”	17
4. ATTENUAZIONE DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO A RADIO FREQUENZA PRODOTTA DA MATERIALI DA COSTRUZIONE	21
5. SCHERMATURA DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO A RADIO FREQUENZA PRODOTTA DA APERTURE TRASPARENTI ALLE FREQUENZE OTTICHE	24
5.1 Vetri con griglie metalliche	26
5.2 Vetri con film sottili	27
5.3 Vetri con metalli trasparenti	27
5.4 Tecniche di deposizione di film sottili	28
5.4.1 <i>Tecnica di sputtering</i>	29
6. FUNZIONAMENTO DI DISPOSITIVI ELETTROMAGNETICI WIRELESS IN AMBIENTE INDOOR	32
7. REQUISITI DI PROGETTO DI NUOVI VETRI SCHERMANTI	32
8. CONCLUSIONI	34
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	34
APPENDICE A. ELEMENTI DI TEORIA DELLA SCHERMATURA ELETTROMAGNETICA	35
APPENDICE B. LIMITI DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO A RADIO FREQUENZA PREVISTI DALLE NORMATIVE	39

RAPPORTO ATTIVITÀ B

INTRODUZIONE	45
1. CARATTERISTICHE DI VETRI SCHERMANTI COMMERCIALI	45
1.1 EmiClare (USA)	45
1.2 Evaporated Inc. (USA)	47
1.3 PGO (Germany)	48

2. METODI DI MISURA DELL'EFFICIENZA DI SCHERMATURA DI FILM SOTTILI	48
2.1 Misura della <i>sheet-resistance</i> di film sottili	48
2.2 Misura di <i>SE</i> in guida d'onda coassiale	50
2.2.1 <i>Standard di misura</i>	50
2.2.2 <i>Standard di misura modificato</i>	50
2.3 Misura di <i>SE</i> in camera riverberante	53
2.4 Tecniche di misura e di stirring in camere riverberanti annidate	57
3. METODI DI CALCOLO DELL'EFFICIENZA DI SCHERMATURA DI FILM SOTTILI	59
3.1 Film sottile piano indefinito	59
3.2 Film sottile sull'apertura di struttura scatolare	61
4. MISURA E CALCOLO DELL'EFFICIENZA DI SCHERMATURA DI CAMPIONI COMMERCIALI	62
4.1 Foglio di polycarbonato commerciale dello spessore di 175 μm rivestito su una delle due superfici da ITO di spessore 0.5 μm	62
4.1.1 <i>Misura della sheet-resistance</i>	62
4.1.2 <i>Misura della SE con cella TEM coassiale</i>	63
4.1.3 <i>Misura della SE con camere riverberanti annidate</i>	64
4.1.4 <i>Calcolo di SE con metodo numerico 3d-FDTD</i>	67
4.2 Caratterizzazione di schermi trasparenti basati su pellicole commerciali	69
5. CONCLUSIONI	75
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	75

RAPPORTO ATTIVITÀ C

INTRODUZIONE	77
1. REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI CAMPIONI DI VETRI COMMERCIALI MODIFICATI	77
1.1 Prestazioni elettromagnetiche e ottiche di pellicole commerciali	77
1.2 Misura dell'efficienza di schermatura di campioni di finestre	80
1.3 Progetto di strutture a sandwich con pellicole commerciali	84
1.3.1 <i>Caratteristiche costruttive delle strutture analizzate</i>	84
1.3.2 <i>Procedura di simulazione delle prestazioni elettromagnetiche</i>	86
1.3.3 <i>Procedura di simulazione delle prestazioni ottiche</i>	87
1.4 Prestazioni elettromagnetiche e ottiche di strutture a sandwich con pellicole commerciali	89
1.5 Realizzazione e caratterizzazione di campioni a sandwich con pellicole commerciali	94
2. PROGETTO E FATTIBILITÀ DI CAMPIONI DI SCHERMI ELETTRROMAGNETICI TRASPARENTI NANOSTRUTTURATI	102
2.1 Caratteristiche dei metalli trasparenti	102
2.2 Requisiti di progetto	102
2.2.1 <i>Efficienza di schermatura elettromagnetica</i>	103
2.2.2 <i>Trasmittanza ottica</i>	103

2.3 Progetto ottimo di uno schermo trasparente nanostrutturato	105
2.3.1 Prestazioni elettromagnetiche	105
2.3.2 Prestazioni ottiche	105
2.3.3 Codici di simulazione	111
2.3.4 Stima di fattibilità	115
2.4 Prestazioni del campione realizzato	116
3. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	120
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	121
APPENDICE A: PARAMETRI OTTICI E TERMICI DI UN VETRO	125
APPENDICE B: MODELLI E ALGORITMI PER LA SIMULAZIONE DELLE PROPRIETÀ OTTICHE	129
APPENDICE C: CODICE DI CALCOLO DELL'EFFICIENZA DI SCHERMATURA DI UNO SCHERMO MULTISTRATO NANOSTRUTTURATO	133

PREFAZIONE

Negli ultimi anni si è assistito a un notevole incremento del numero di impianti di radiotelecomunicazione presenti sul territorio nazionale, dovuto della pressante necessità di assicurare la continuità e la qualità dei servizi. Questo fenomeno ha dato origine alla questione ambientale e sanitaria legata alle emissioni elettromagnetiche, tant'è che si è assistito ad un proliferare di applicazioni di scarsa validità scientifica, funzionali a ridurre le emissioni di radiazioni elettromagnetiche negli ambienti abitativi (ad esempio, tendaggi) nonché soluzioni atte ad “assorbire” tali radiazioni (coccinelle, ecc.) al fine di venire incontro alle preoccupazioni dei cittadini. Tale situazione ha determinato la necessità di trovare nuove e più affidabili soluzioni, tecniche e metodologie utili alla mitigazione e alla riduzione dei campi elettromagnetici immessi negli ambienti abitativi e di lavoro.

In tale ambito, i materiali schermanti rappresentano una delle tecnologie comunemente impiegate. In alcuni ambienti confinati si può altresì presentare una duplice esigenza: da una parte dover disporre di apposite aperture, al fine di assicurare un'adeguata visibilità verso l'ambiente esterno, e dall'altra la necessità di proteggere le persone dagli effetti prodotti dai campi elettromagnetici, i quali possono penetrare negli ambienti interni attraverso le aperture stesse. Risulta pertanto utile, in tali casi, l'utilizzo di dispositivi che presentino significative proprietà elettromagnetiche schermanti unite ad una adeguata trasparenza ottica.

Questi particolari requisiti tecnici hanno suggerito di affrontare il tema di ricerca oggetto del presente lavoro, relativo al progetto e alla realizzazione di schermi innovativi dotati di un'elevata efficienza di schermatura a radiofrequenza e, allo stesso tempo, di una buona trasmittanza ottica nel campo del visibile.

L'ISPRA ha quindi attivato un progetto di ricerca, condotto in collaborazione con il Centro di Ricerca di Nanotecnologie applicate all'Ingegneria della Sapienza (CNIS). La problematica è risultata peraltro di grande interesse anche a causa della notevole attenzione dedicata al soddisfacimento di requisiti di compatibilità elettromagnetica sempre più stringenti, tanto che ha suscitato un vivo interesse da parte delle aziende multinazionali operanti nel settore della produzione di vetri multifunzionali e ha conferito all'attività stessa un respiro internazionale.

L'attività di ricerca ha avuto come risultato la verifica sperimentale delle proprietà schermanti di vetri realizzati tramite l'applicazione sequenziale (“sandwich”) di pellicole sottili a base di materiali semiconduttori o metallici, attualmente disponibili sul mercato, ed anche la realizzazione di particolari vetri multistrato nanostrutturati. Tali strutture sono rispondenti a precise specifiche di progetto per quanto concerne sia le prestazioni elettromagnetiche sia la trasmittanza ottica. Nell'ambito della ricerca, inoltre, sono state testate metodologie e standard innovativi per la misura dell'efficienza di schermatura elettromagnetica, sia in condizioni di laboratorio sia in situazioni che riproducono le tipiche modalità di installazione dei vetri stessi. C'è da rilevare altresì che gli schermi realizzati consentono anche elevate prestazioni schermanti nei confronti della radiazione solare, con ricadute positive anche in relazione al risparmio energetico e alla riduzione delle emissioni in atmosfera.

Nello specifico, lo studio è articolato in tre attività, come di seguito riportato.

Attività A

È stata condotta un'indagine per accertare l'intensità dei livelli di campo elettromagnetico a radiofrequenza riscontrabili in ambiente urbanizzato. I risultati ottenuti hanno consentito di definire le specifiche di progetto dei vetri schermanti.

Attività B

Sono state testate sperimentalmente le prestazioni di vetri disponibili in commercio utilizzati comunemente per la schermatura del campo elettromagnetico a radiofrequenza. E' stata misurata anche l'efficienza di schermatura elettromagnetica di vetri commerciali utilizzati per la protezione dall'irraggiamento solare nel campo dell'infrarosso. Infine, sono stati sviluppati modelli di simulazione numerica delle prestazioni schermanti dei vetri.

Attività C

I risultati delle misure e delle simulazioni, eseguite su vetri commerciali, sono stati utilizzati per la progettazione e la realizzazione di prototipi, sui quali sono stati eseguiti test di laboratorio al fine di valutarne le prestazioni elettromagnetiche, ottiche e meccaniche. Sono stati realizzati schermi su substrato vetroso, mediante l'applicazione di film sottili di materiale elettricamente conduttore, e schermi trasparenti nanostrutturati.

Ing. Salvatore Curcuruto
Prof. Marcello D'Amore

RAPPORTO ATTIVITÀ A

INTRODUZIONE

In questa attività è stata svolta un'indagine per accertare l'intensità dei livelli di campo elettromagnetico ad alta frequenza riscontrabili in ambiente urbanizzato.

Preliminarmente è stato condotto uno studio sulle sorgenti tipicamente presenti in ambiente urbano, valutando le possibili situazioni di criticità. In tale ambito, sono stati riportati alcuni casi di letteratura che attestano situazioni di superamento dei limiti normativi anche all'interno degli edifici. Si è passato quindi a simulare possibili configurazioni di sorgenti di campo elettromagnetico riscontrabili in ambito urbano che possono dar luogo a superamenti dei limiti di legge, tenendo conto anche dell'attenuazione offerta dalle strutture edili.

Sulla base di quanto detto, sono state quindi individuate le tecnologie di realizzazione dei vetri che presentano capacità di schermatura dei campi elettromagnetica a radiofrequenza e, al contempo, una buona trasmittanza ottica. I risultati ottenuti hanno infine consentito di definire le specifiche di progetto dei vetri schermanti.

1 Sorgenti di campo elettromagnetico a radiofrequenza

Le sorgenti di campo elettromagnetico a radiofrequenza che vengono prese in considerazione ai fini dell'impatto ambientale sono i ponti radio, i sistemi radiomobili (comprese stazioni radiobase per telefonia cellulare), i sistemi radiotelevisivi, i sistemi di comunicazione satellitare, i radar, gli impianti di telerilevamento.

Le bande di frequenza dedicate alla trasmissione con ponti radio sono comprese tra 1 GHz e 40 GHz; quelle maggiormente utilizzate sono 3.7-4.2 GHz, 5.925-6.425 GHz e 10.7-11.7 GHz. I livelli di potenza variano da alcune centinaia di mW a 20 W per canale. Un sistema a pieno carico può contenere dodici canali a 4 GHz e otto canali a 6 GHz su una singola antenna. I sistemi possono essere unidirezionali o bidirezionali. Le antenne, generalmente riflettori ad horn o parabolici, hanno alto guadagno (30-40 dB) e ampiezza del fascio piuttosto stretta (2.5 gradi o meno). Il sistema telefonico pubblico mediante ponti radio a microonde opera nel campo di frequenza 2-13 GHz con potenza fino a 500 kW come nelle comunicazioni via satellite.

I sistemi radiomobili comprendono tutte le trasmissioni che avvengono tramite telefoni cellulari, telefoni senza fili, apparecchi montati su veicoli e apparecchiature per radioamatori. Le bande di frequenza sono 127-150 MHz, 150-170 MHz, 450-512 MHz, 800-900 MHz. Le bande cittadine operano a 27 MHz, i telefoni senza fili tra 46 e 60 MHz ed alcuni anche a 915 MHz, i telefoni cellulari in due bande nell'intorno di 900 e 1800 MHz. I livelli di potenza variano a seconda del tipo di apparecchiatura utilizzata. In generale sono minori di 10 W per trasmettitore. Le bande cittadine hanno una potenza massima di 5 W. I telefoni senza fili hanno potenze inferiori ad 1 W, negli apparecchi montati su veicoli all'antenna viene fornita una potenza variabile da 3 W a 100 W. I cellulari radiomobili hanno una potenza irradiata in antenna di 7 W, il che limita la potenza al trasmettitore a circa 3.5 W.

I sistemi radiotelevisivi hanno potenze variabili da qualche chilowatt a centinaia di chilo-

watt, anche maggiori nel caso di più trasmettitori in parallelo. Le frequenze utilizzate per radio diffusione sono di seguito elencate:

- servizio radiofonico: onda lunga 155-285 kHz; onda media 525-1605 kHz; onda corta 3950-6100 kHz; modulazione di frequenza 87,5-108 MHz;
- servizio televisivo: banda I e III 47-230 MHz (VHF); banda IV e V 470-862 MHz (UHF).

Gli impianti radiofonici presentano potenze irradiate di qualche centinaio di watt sino al centinaio di chilowatt; gli impianti televisivi sono costituiti da ripetitori con potenze tra qualche watt e qualche chilowatt.

Nella radiodiffusione le principali sorgenti di campo elettromagnetico sono i trasmettitori e i ripetitori. Le trasmissioni via satellite rappresentano un sistema economico di trasmissione alternativo a quello via cavo e fili per l'invio di voci, immagini TV e dati. Le antenne delle stazioni terrestri sono comunemente riflettori parabolici circolari, il cui diametro è dell'ordine di almeno 100 volte la lunghezza d'onda del campo irradiato. Le antenne sono caratterizzate da un alto guadagno (circa 60 dB e più) e da una stretta ampiezza del fascio di emissione (alcune decine di gradi). Numerose bande di frequenza fra 100 MHz e 275 GHz sono dedicate ai servizi via satellite mobili e fissi. Le bande di frequenza più comunemente usate sono 5.4-6.65 GHz, 14,0-14,5 GHz, 27-31 GHz. Le potenze variano tra qualche decina di watt ed un kW per canale.

I radar sono utilizzati per la radionavigazione, la rilevazione meteorologica e la misura della velocità dei veicoli. Il segnale emesso può essere ad onda continua o ad impulsi, della durata di microsecondi o nanosecondi (ultra-wide-band), con frequenze di ripetizione tipiche di 1000 Hz. Le frequenze utilizzate sono normalmente superiori ad 1 GHz. Più alta è la frequenza, maggiore risulta la risoluzione spaziale ottenuta. La potenza dei trasmettitori radar dipende dalla specifica applicazione: i radar metrologici a bordo di aerei presentano potenze comprese tra 40 e 80 kW; quelli utilizzati per il controllo del traffico aereo fino a parecchi megawatt.

2 Predizione del campo elettromagnetico a radio frequenza

2.1 Metodi di calcolo

I problemi di radiazione e di diffusione elettromagnetica possono essere risolti con procedure analitiche solo in casi molto semplici. La soluzione di problemi pratici in geometrie casuali richiede l'applicazione di metodi numerici e l'uso di idonei codici. Tali metodi consentono di calcolare l'intensità e la fase delle componenti del campo elettrico, del campo magnetico e della densità di potenza.

A seconda dell'intervallo di frequenza considerato e delle dimensioni geometriche della struttura interessata, si utilizzano i seguenti metodi di calcolo: ottica fisica, teoria fisica della diffrazione, ottica geometrica, teoria geometrica della diffrazione, teoria uniforme della diffrazione, metodo delle correnti equivalenti, metodo dei momenti, metodo delle differenze finite, metodi ibridi.

Il ray tracing descrive un metodo per la produzione di immagini costruite in sistemi di computer grafica 3D, tracciando, all'inverso, il percorso che potrebbe aver seguito un raggio di luce prima di colpire un'immaginaria lente. Mentre la scena viene attraversata seguendo il percorso di numerosi raggi, le informazioni sull'aspetto della scena vengono accumulate. La riflessione

del raggio, la sua rifrazione o l'assorbimento sono calcolate nel momento in cui colpisce un qualsiasi oggetto.

Le scene nel ray tracing, descritte matematicamente o mediante rappresentazioni grafiche, possono anche includere immagini e modelli creati attraverso varie tecnologie, ad esempio tramite la fotografia digitale. Seguendo i raggi in senso inverso, l'algoritmo viene alleggerito di molti gradi di "magnitudine", consentendo una precisa simulazione di tutte le possibili interazioni presenti nella scena.

Nel caso di più antenne emittenti il campo totale nel punto di osservazione viene calcolato considerando la presenza di tutte le antenne come la somma vettoriale di tutti i contributi corrispondenti ai principali raggi che lo raggiungono dopo un certo numero di interazioni con gli ostacoli presenti nell'ambiente circostante. Effetti come riflessione ed ombra difficilmente simulabili con altri metodi, sono il risultato naturale di questo algoritmo: un'implementazione relativamente semplice conduce a risultati di grande interesse.

2.2 Metodologie per la verifica del rispetto dei limiti di campo

Le indagini preliminari devono verificare se in qualche punto accessibile alla popolazione si può prevedere il superamento dei limiti normativi. Per effettuare la verifica si possono seguire due metodologie:

1. individuazione su carta planimetrica dei punti critici intorno alla stazione, valutazione puntuale del campo elettromagnetico e confronto con i limiti;
2. calcolo del volume di rispetto e sovrapposizione dello stesso sulla carta planimetrica.

Il volume di rispetto è costituito da una opportuna figura geometrica solida (usualmente un parallelepipedo o la composizione di due cilindri) che racchiude tutti i punti dello spazio nei quali il limite di campo viene superato. Il calcolo del volume di rispetto può essere eseguito seguendo le procedure descritte nella norma CEI 211-10 [7].

3 Livelli critici del campo elettromagnetico a radiofrequenza incidente su edifici in ambiente urbano

3.1 Analisi di coperture macrocellulari e microcellulari per telefonia mobile

Gli ambienti urbani sono caratterizzati da una molteplicità di tipologie di sorgenti a radiofrequenza, nonché da elevato traffico, costituite principalmente dalle stazioni radio base della telefonia cellulare e dai ripetitori radiotelevisivi.

Negli ultimi anni i gestori di telefonia e delle emittenti radiotelevisive hanno dovuto far fronte a due opposte necessità: garantire un servizio efficiente ai propri clienti e, al contempo, assicurare il rispetto dei limiti di emissione di campo elettromagnetico imposti dalla normativa nazionale per la popolazione.

Le tecniche utilizzate al fine del raggiungimento di detto scopo hanno riguardato la corretta individuazione geografica degli impianti e la regolazione della potenza emessa dagli stessi. Per quanto riguarda la telefonia mobile, il ricorso ad un incremento del numero degli impianti (divisione del territorio in microcelle) ha permesso di contenere la potenza emessa, consentendo

notevoli vantaggi sia nella copertura spaziale del servizio sia nell'abbattimento dei livelli di campo elettromagnetico immessi nell'ambiente. Le reti cellulari, infatti, si avvalgono di celle di dimensioni diverse, in funzione della capacità richiesta: le celle di dimensioni minori vengono utilizzate laddove la richiesta di traffico è maggiore (centri storici, centri commerciali, stazioni, aeroporti, ecc.), in quanto consentono un elevato riuso delle frequenze; le celle di dimensioni maggiori, invece, possono coprire aree più grandi, nelle quali il riuso delle frequenze risulta meno intenso.

È quindi possibile distinguere, in area urbana, due diverse tipologie di installazioni: sistemi a macrocelle e sistemi a microcelle. Questa suddivisione è definita in base alla dimensione del raggio della cella, alla potenza ed alla tipologia d'installazione. La macrocella è una cella realizzata con una stazione radio base dotata di un sistema di antenne installate al di sopra della massima altezza dei tetti degli edifici della zona circostante, il raggio della cella è compreso tra 1 e 10 km. La microcella, invece, è realizzata con antenne montate ben al di sotto del livello dei tetti degli edifici, ad alcuni metri da terra. In questo caso il raggio della cella è compreso tra 100 e 500 metri. I risultati ottenuti tramite simulazione numerica in uno scenario rappresentato da una parte del centro storico di Bologna mostrano livelli di campo elettromagnetico generalmente inferiori al limite di 6 V/m previsto dalla normativa.

3.2 Rilievi sperimentali

Sono stati pubblicati numerosi casi di situazioni in cui una molteplicità di sorgenti ha dato luogo a consistenti superamenti dei limiti di immissione di campo elettromagnetico, anche in ambienti indoor.

Nel gennaio 2007, presso l'immobile dell'Ufficio "Strade e Fogne" ubicato a Salerno in Via di Belvedere n. 37, sono state effettuate delle operazioni di misura in banda larga. In tale sito sono presenti due stazioni radio base e numerose stazioni di emittenti radiotelevisive. I risultati delle misure sono riportati nella tabella 3.2.1: è da notare che i superamenti riguardano sia le pertinenze esterne dell'immobile (lastrici solari), sia alcune ambienti interni all'edificio stesso.

Tabella 3.2.1 - Valori di campo elettromagnetico misurato presso l'Ufficio "Strade e Fogne" del Comune di Salerno.

PUNTI DI MISURA	DESCRIZIONE	PERMANENZA > 4 ORE	DATA MISURA	ORA MISURA	E (V/m)	H (A/m)	S (W/m ²)	E (V/m) ANTE OPERAM
A	Ingresso	si	29/01/07	12:48	0,47	0,0012	0,0006	0,98
B	Corridoio cucina	si	29/01/07	12:56	0,69	0,0018	0,0013	1,42
C	Corridoio bagno	si	29/01/07	13:04	0,74	0,0020	0,0015	1,15
D	Ufficio n°4	si	29/01/07	13:12	0,94	0,0025	0,0023	1,64
E	Cucina	si	29/01/07	13:20	1,14	0,0030	0,0034	1,54
F	Ufficio n°3	si	29/01/07	13:28	1,00	0,0027	0,0027	1,57
G	Ufficio n°1	si	29/01/07	13:36	1,30	0,0034	0,0045	3,28
H	Ufficio n°2	si	29/01/07	13:44	1,34	0,0036	0,0048	3,50
I	Ufficio n°5	si	29/01/07	13:52	0,73	0,0019	0,0014	1,22
L	Corridoio bagno	si	29/01/07	14:00	0,93	0,0025	0,0023	1,48
M	Ufficio n°6	si	29/01/07	14:08	0,92	0,0024	0,0022	2,94
N	Corridoio bagno	si	29/01/07	14:16	1,60	0,0042	0,0068	2,20
O	Ufficio n°7	si	29/01/07	14:24	1,44	0,0038	0,0055	6,16
P	Corridoio bagno	si	29/01/07	14:32	2,01	0,0053	0,0107	2,77
Q	Bagno	si	29/01/07	14:40	1,13	0,0030	0,0034	1,90
R	Bagno	si	29/01/07	14:48	1,29	0,0034	0,0044	2,21
S	Ufficio n°8	si	29/01/07	14:56	2,30	0,0061	0,0140	4,53
T	Ufficio n°8	si	29/01/07	15:04	1,74	0,0046	0,0080	7,09
U	Ufficio n°8	si	29/01/07	15:12	2,27	0,0060	0,0137	5,87
L1	Scala lastrico	si	29/01/07	15:20	5,67	0,0150	0,0853	5,50
L2	Lastrico	si	29/01/07	15:28	6,64	0,0176	0,1169	6,97
L3	Lastrico	si	29/01/07	15:36	7,04	0,0187	0,1315	8,53
L4	Lastrico	si	29/01/07	15:44	8,92	0,0237	0,2111	6,68
L5	Lastrico	si	29/01/07	15:52	9,22	0,0245	0,2255	9,48
L6	Torrino su lastrico	si	29/01/07	16:00	8,76	0,0232	0,2035	6,81
E1	Esterno edificio	si	29/01/07	16:10	2,35	0,0062	0,0146	2,25
E2	Esterno edificio	si	29/01/07	16:18	5,11	0,0136	0,0693	4,81
E3	Esterno edificio	si	29/01/07	16:26	5,12	0,0136	0,0695	4,73
E4	Esterno edificio	si	29/01/07	16:34	3,21	0,0085	0,0273	2,76
E5	Esterno edificio	si	29/01/07	16:42	2,75	0,0073	0,0201	3,07
E6	Esterno edificio	si	29/01/07	16:50	3,04	0,0081	0,0245	2,38
E7	Esterno edificio	si	29/01/07	16:58	3,10	0,0082	0,0255	3,41
E8	Esterno edificio	si	29/01/07	17:06	3,54	0,0094	0,0332	3,30
E9	Esterno edificio	si	29/01/07	17:14	4,46	0,0118	0,0528	4,37

Nello stesso stabile è stato realizzato anche un monitoraggio in continuo dei campi elettromagnetici (tuttora in corso) tramite l'utilizzo di una centralina di monitoraggio, attiva dall' 8 agosto 2003, posizionata all'interno dell'ufficio n. 8. Nella figura 4.2.1 viene riportato, a titolo di esempio, l'andamento del campo elettrico rilevato il giorno 2 ottobre 2003, durante il quale è risultato un superamento dei limiti.

2 ottobre 2003

Valori di Campo Elettrico (V/m) intera giornata	
medio	7.86
massimo	8.42

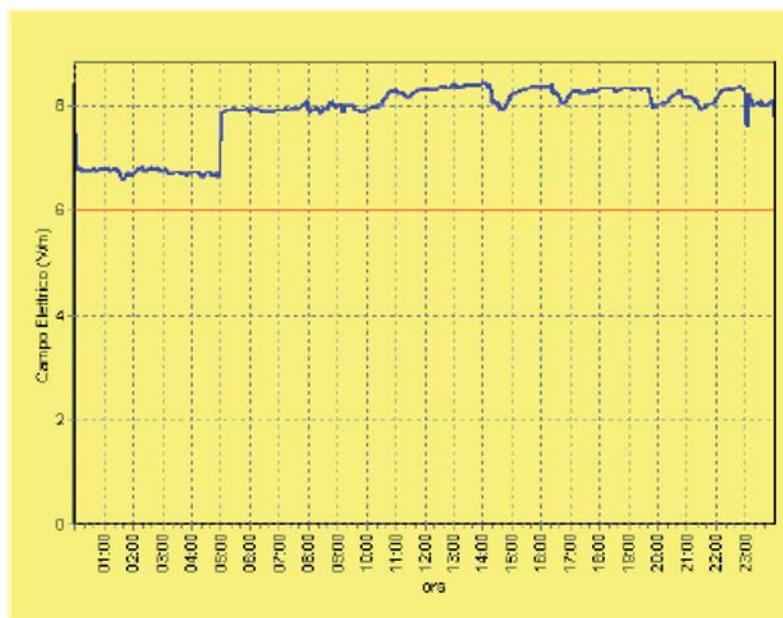


Figura 3.2.1 - *Andamento temporale del campo elettrico misurato.*

Nei giorni 27 e 28 aprile 2001 fu eseguita in località Cesano, da parte di WWF Italia-settore elettromog-responsabile Guido Santonocito, una campagna di monitoraggio ambientale del campo elettromagnetico a radio frequenza generato da Radio Vaticana. Di seguito si riportano i valori di campo elettrico misurati in alcuni ambienti:

- Via Baccanello,156: all’interno di villa, 7 V/m;
- Via Senio n. 25: cantina: 8 V/m; esterno finestra appartamento int. 3, 8 V/m; esterno finestra appartamento int. 1, 23 V/m; piano rialzato: soggiorno 19 V/m, camera letto 24 V/m; primo piano int. 4, balcone, 17 V/m; lavatoio condominiale, ottavo piano, 7 V/m; terrazzo condominiale, ottavo piano, 16 V/m.

Dopo accurate indagini svolte dall’Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Toscana (ARPAT), è emerso che le emissioni dei ripetitori radio TV siti nel Comune di Poggio Incontro, nei pressi dell’omonimo convento, superavano i livelli di campo elettromagnetico previsti dalla legge. Tali misure, effettuate il giorno 19 luglio 2005, hanno permesso di rilevare all’interno del giardino del convento valori di campo elettrico generalmente compresi tra 3 e 10 V/m, con valori di picco fino a 25 V/m; internamente il valore più alto si è registrato in una stanza con un valore che si attestava al sopra i 6 V/m. Le successive misure effettuate a “banda stretta” nel punto identificato a maggiore esposizione, hanno dimostrato il continuo superamento dei valori previsti.

3.3 Simulazione numeriche di una tipica situazione “hot spot”

Tramite un software commerciale è stato simulato un caso tipico di hot spot. Sulla sommità di un edificio di altezza pari a 35 metri sono state considerate due stazioni radiobase (SRB1 e SRB2), due impianti radio (RADIO1 e RADIO2), e un impianto televisivo (TV). I parametri tecnici delle suddette stazioni emittenti sono di seguito riportati.

SRB1:

- n. 3 celle DCS (1800 MHz), ciascuna con n. 6 portanti da 7 W ognuna
- n. 3 celle GSM (900 MHz), ciascuna con n. 6 portanti da 7 W ognuna
- n. 3 celle UMTS (2100 MHz), ciascuna con n. 2 portanti da 10 W ognuna

SRB2:

- n. 3 celle DCS (1.800 MHz) ciascuna con n. 4 portanti da 7 W ognuna
- n. 3 celle GSM (900 MHz) ciascuna con n. 2 portanti da 14 W ognuna
- n. 3 celle UMTS (2.100 MHz) ciascuna con n. 2 portanti da 13 W ognuna

RADIO1:

- $f = 88$ MHz
- $P = 5000$ W

RADIO2:

- $f = 88$ MHz
- $P = 2000$ W

TV:

- $f = 470$ MHz
- $P = 500$ W

È stato simulato il livello del campo elettrico emesso da ogni stazione separatamente e anche quello generato da tutte le sorgenti attive contemporaneamente. I risultati sono stati visualizzati su due piani verticali, uno longitudinale e uno trasversale, quest'ultimo posto ad una distanza pari a 39 m dalla facciata del palazzo.

Le figure 3.3.1-3.3.6 mostrano i diagrammi di irradiazione del campo elettrico calcolato lungo il piano di analisi longitudinale: sono riportate le configurazioni di campo con ciascuna sorgente attiva singolarmente e con tutte le sorgenti attive contemporaneamente.

Si può notare come i valori relativi alle stazioni radiobase SRB1 e SRB2 siano modesti, così come per la stazione televisiva TV, mentre le stazioni radio RADIO1 e RADIO2, anche a causa del diagramma di irradiazione meno direttivo, forniscono un contributo maggiore. Il campo elettrico risultante dalla sovrapposizione delle emissioni generate da tutte le sorgenti risulta maggiore di 6 V/m (limite previsto dalla legge) già nelle immediate vicinanze della facciata del palazzo e raggiunge picchi superiori ai 20 V/m.

ANALISI CAMPO ELETTROMAGNETICO
Piano Verticale
Previsione tra 0.00 e 60.00 m S.L.M.
Orientamento a 089g59'56"98 N
(Min, Max) - (0.00, 133.27) [V/m]

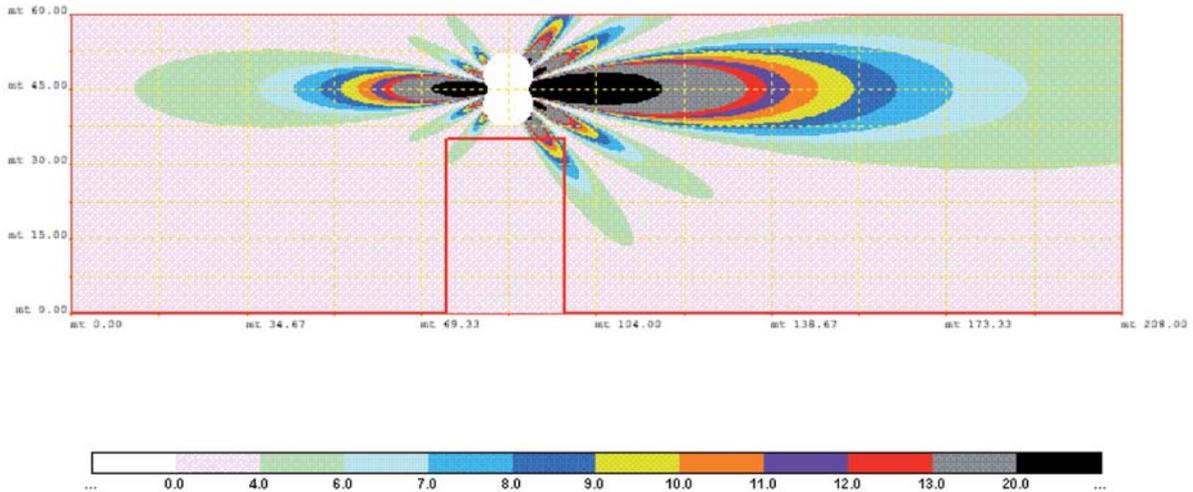


Figura 3.3.1 - Diagramma di irradiazione risultante della stazione RADIO1 sul piano di analisi longitudinale (valori in V/m).

ANALISI CAMPO ELETTROMAGNETICO
Piano Verticale
Previsione tra 0.00 e 60.00 m S.L.M.
Orientamento a 089g59'56"98 N
(Min, Max) - (0.00, 185.17) [V/m]

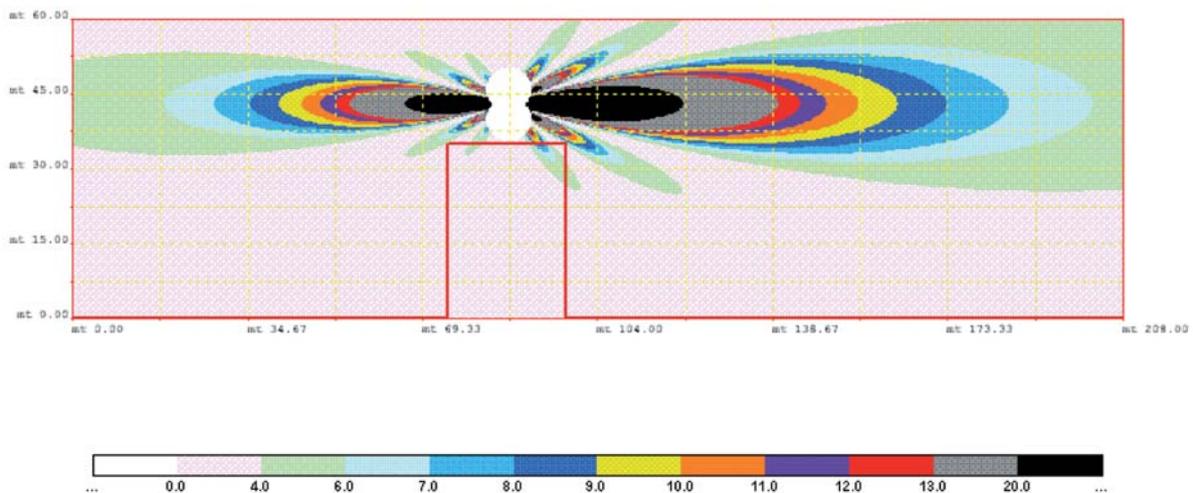


Figura 3.3.2 - Diagramma di irradiazione risultante della stazione RADIO2 sul piano di analisi longitudinale (valori in V/m).

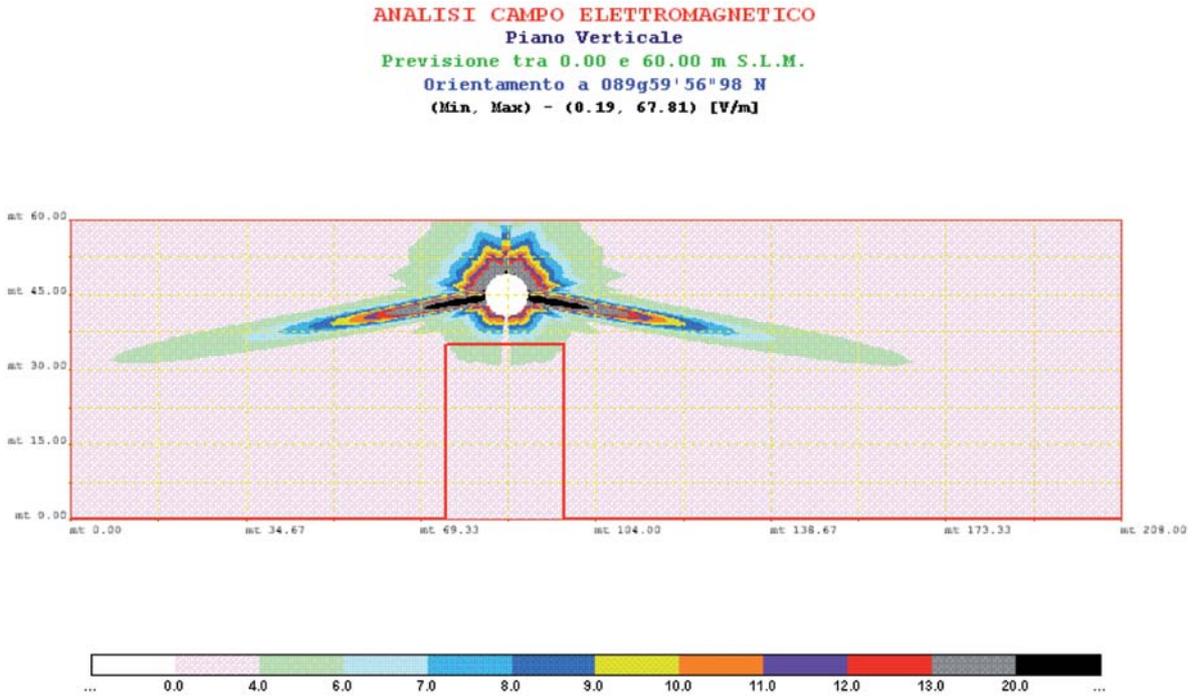


Figura 3.3.3 - Diagramma di irradiazione risultante della stazione SRB1 sul piano di analisi longitudinale (valori in V/m).

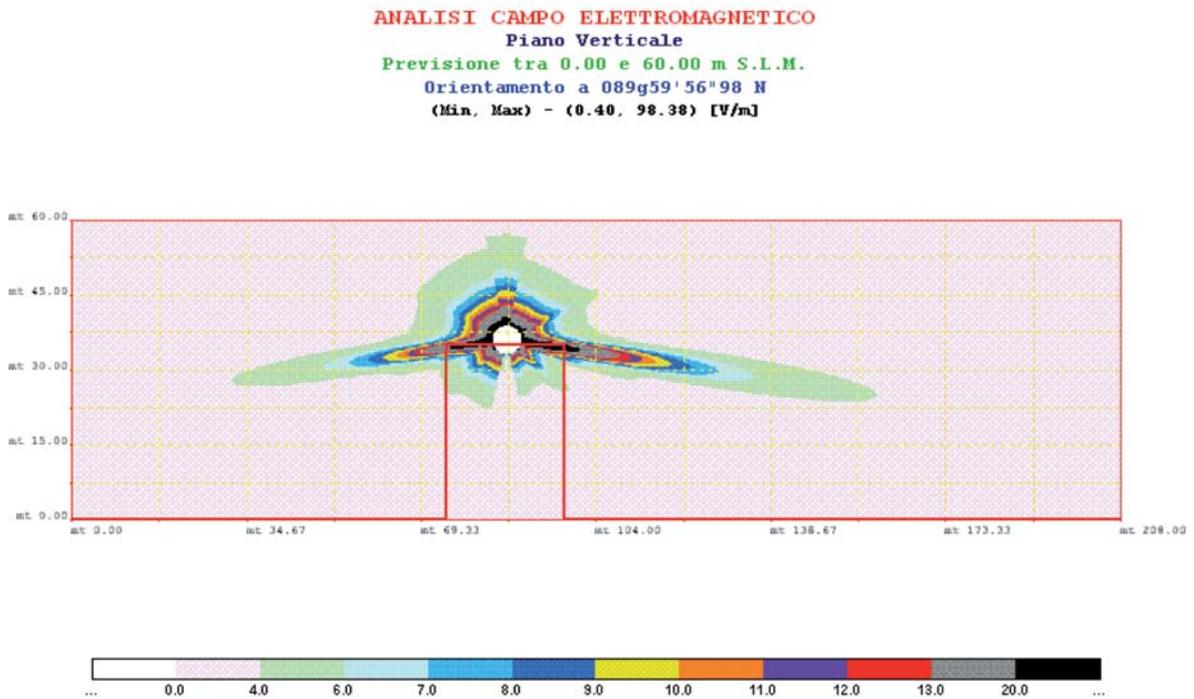


Figura 3.3.4 - Diagramma di irradiazione risultante della stazione SRB2 sul piano di analisi longitudinale (valori in V/m).

ANALISI CAMPO ELETTROMAGNETICO
Piano Verticale
Previsione tra 0.00 e 60.00 m S.L.M.
Orientamento a 089g59'56"98 N
(Min, Max) - (0.00, 68.75) [V/m]

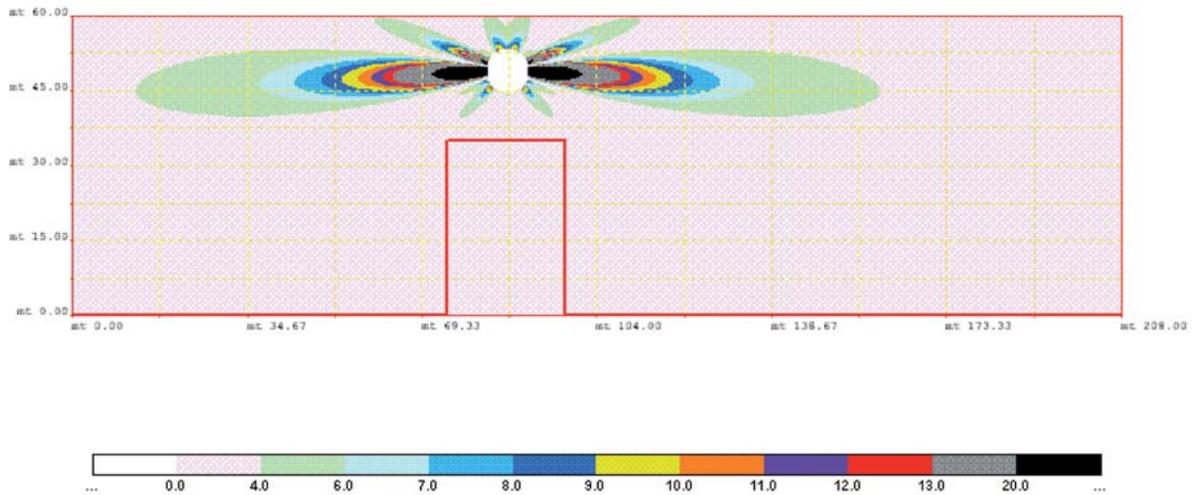


Figura 3.3.5 - *Diagramma di irradiazione risultante della stazione TV sul piano di analisi longitudinale (valori in V/m).*

ANALISI CAMPO ELETTROMAGNETICO
Piano Verticale
Previsione tra 0.00 e 60.00 m S.L.M.
Orientamento a 089g59'56"98 N
(Min, Max) - (0.62, 131.30) [V/m]

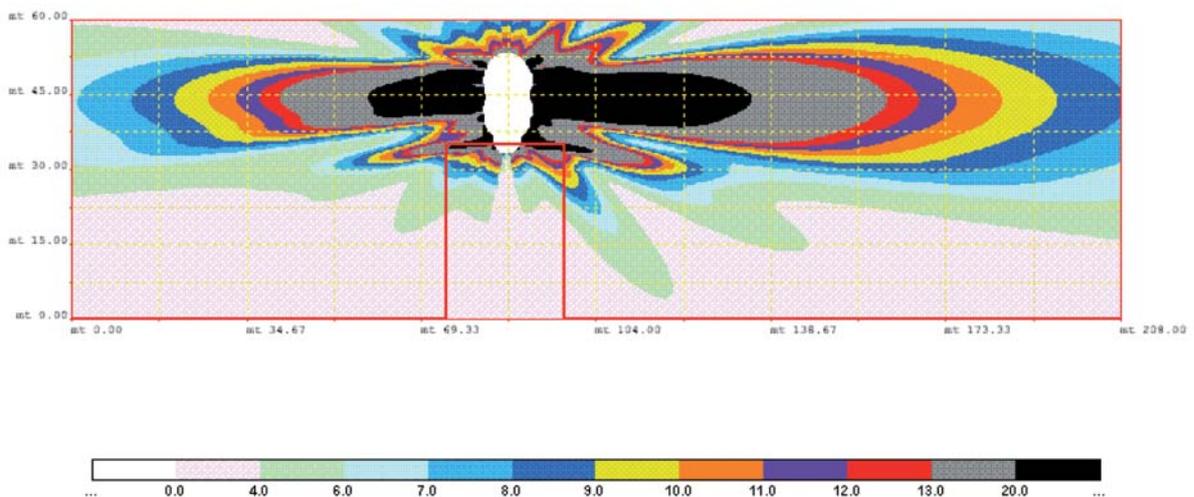


Figura 3.3.6 - *Diagramma di irradiazione risultante da tutte le sorgenti sul piano di analisi longitudinale (valori in V/m).*

4 Attenuazione del campo elettromagnetico a radio frequenza prodotta da materiali da costruzione

L'efficienza di schermatura (SE) è definita come il rapporto tra le ampiezze del campo magnetico o elettrico in un punto in assenza E, H ed in presenza dello schermo \hat{E} , \hat{H} :

$$SE_{E_dB} = 20 \log \frac{E}{\hat{E}} \quad (4.1)$$

$$SE_{H_dB} = 20 \log \frac{H}{\hat{H}} \quad (4.2)$$

In regione di campo lontano, il rapporto tra campo elettrico e campo magnetico è uguale all'impedenza d'onda, pari a 377Ω , indipendentemente dalla frequenza, per cui l'efficienza di schermatura assume lo stesso valore numerico sia per il campo elettrico che per il campo magnetico.

Il campo elettromagnetico a radiofrequenza incidente su un edificio subisce un'attenuazione (SE) che dipende da numerose grandezze, quali l'angolo di incidenza, la frequenza del campo incidente, la forma e la struttura dell'edificio, le proprietà dei materiali con cui è costruito e lo spessore delle pareti. E' da osservare, inoltre, che la presenza di finestre trasparenti negli edifici contribuisce all'aumento della penetrazione in misura dipendente dalla posizione, dalla forma e dal tipo di materiale utilizzato. La penetrazione del campo è solitamente maggiore nei locali situati ai piani più alti di un edificio per i quali si può verificare un'illuminazione diretta, mentre ai piani più bassi l'ambiente urbano contribuisce ad aumentare l'attenuazione.

La tabella 4.1 mostra l'attenuazione del campo elettromagnetico a radio frequenza prodotta da materiali da costruzione in differenti strutture [8].

Tabella 4.1 - Attenuazione del campo elettromagnetico a radiofrequenza prodotta da materiali da costruzione in differenti edifici.

<i>Tipologia</i>	<i>Struttura (materiale)</i>	<i>Attenuazione (dB) (a ridosso)</i>	<i>Attenuazione (dB) (più internamente)</i>
Capannoni	Lamiera ondulata con finestre a intelaiatura metallica	20	-
Edifici commerciali o adibiti a uffici	Cemento armato, finestre a intelaiatura metallica	15	19.5
Edifici con vetro predominante	Cemento armato e vetro	12.5	17
Abitazioni in area urbana	Cemento armato e/o muratura (con muri molto spessi)	10	14.5
Abitazioni in area suburbana	Mattoni (spessore medio), fibrocemento	6	7.5
Abitazioni isolate in area aperta	Muratura (spessore medio), legno	3	4.5

La tabella 4.2 mostra l'attenuazione del campo elettromagnetico a radio frequenza prodotta da alcuni materiali tipicamente utilizzati in edilizia [9].

Tabella 4.2 - Attenuazione del campo elettromagnetico a radiofrequenza prodotta da materiali da costruzione.

<i>Materiali</i>	<i>Spessore (mm)</i>	<i>Frequenza (MHz)</i>	<i>Attenuazione (dB)</i>
Cemento: acqua/cemento=40%, dimensione max. agglomerato 12.7 mm, 22% in peso di cemento, densità media 2.31 g/cc	102	500	10
		900	18
		1800	16
		5000	24
		8000	28
Cemento: acqua/cemento=40%, dimensione max. agglomerato 12.7 mm, 22% in peso di cemento, densità media 2.31 g/cc	203	500	20
		900	23
		1800	27
		5000	46
		8000	62
Cemento: acqua/cemento=40%, dimensione max. agglomerato 12.7 mm, 22% in peso di cemento, densità media 2.31 g/cc	305	500	32
		900	35
		1800	35
		5000	74
		8000	90
Mattone forato di cemento: densità media nominale 1.84 g/cc, effettiva 1.04 g/cc	203	500	8
		900	12
		1800	11
		5000	15
		8000	18
Mattone forato di cemento: densità media nominale 1.84 g/cc, effettiva 1.04 g/cc	406	500	13
		900	17
		1800	18
		5000	26
		8000	30
Mattone forato di cemento: densità media nominale 1.84 g/cc, effettiva 1.04 g/cc	610	500	26
		900	28
		1800	29
		5000	39
		8000	40
Cartongesso: densità 0.87 g/cc	6	500	0.21
		900	0.3
		1800	0.7
		5000	0
		8000	0.4
Cartongesso: densità 0.66 g/cc	13	500	0.21
		900	0.3
		1800	0.7
		5000	0.2
		8000	0.4
Cartongesso: densità 0.66 g/cc	16	500	0.21
		900	0.3
		1800	0.7
		5000	0
		8000	0.9

segue **Tabella 4.2** - *Attenuazione del campo elettromagnetico a radiofrequenza prodotta da materiali da costruzione.*

<i>Materiale</i>	<i>Spessore (mm)</i>	<i>Frequenza (MHz)</i>	<i>Attenuazione (dB)</i>
Vetro per finestre: densità 2.49 g/cc	6	500	0.02
		900	0.07
		1800	1.2
		5000	1.0
		8000	1.5
Vetro per finestre: densità 2.49 g/cc	13	500	1.2
		900	2.1
		1800	3
		5000	0.1
		8000	1.8
Vetro per finestre: densità 2.49 g/cc	19	500	2.1
		900	3
		1800	3.6
		5000	0.4
		8000	1.0
Legno di abete asciutto: densità 0.409 g/cc	38	500	2
		900	2.8
		1800	3.4
		5000	3.0
		8000	4.0
Compensato: densità 0.565 g/cc	32	500	0.7
		900	1.3
		1800	1.8
		5000	1
		8000	1
Cemento armato: rapporto acqua/cemento=36%, dimensione max aggregati 25.4 mm, 14% in peso di cemento e densità media 2.38 g/cc Griglia: acciaio 2%, diametro barre 19 mm, luce 140 mm x 140 mm	203	500	22
		900	27
		1800	29
		5000	53
		8000	68
Cemento armato: rapporto acqua/cemento=36%, dimensione max aggregati 25.4 mm, 14% in peso di cemento e densità media 2.38 g/cc Griglia: acciaio 2%, diametro barre 19 mm, luce 70 mm x 70 mm	203	500	26
		900	30
		1800	33
		5000	57
		8000	71
Grata in aria: acciaio 2%, diametro barre 19 mm, luce 70 mm x 70 mm		500	3.5
		900	3.0
		1800	1
		5000	0.8
		8000	0.6
Grata in aria: acciaio 2%, diametro barre 19 mm, luce 70 mm x 70 mm		500	15
		900	14
		1800	11
		5000	2.7
		8000	1.9

L'attenuazione prodotta dal cemento armato dipende essenzialmente dalla struttura della griglia metallica e dalle sbarre in esso inserite. Le sbarre possono essere di diverse geometrie e dimensioni per ottenere la miglior adesione possibile alla struttura di cemento. Le griglie sono costituite da fili d'acciaio di diametro compreso tra 3 e 16 mm; l'apertura della griglia è tra 10 e 15 cm.

Alle basse frequenze la griglia riflette il campo elettromagnetico incidente in quanto la lunghezza d'onda λ è molto maggiore del lato della stessa griglia (periodicità). Al crescere della frequenza, il comportamento induttivo della griglia riduce l'efficienza di schermatura, in quanto il campo tende a penetrare attraverso le aperture in misura crescente al diminuire della lunghezza d'onda.

5 Schermatura del campo elettromagnetico a radio frequenza prodotta da aperture trasparenti alle frequenze ottiche

Le prestazioni di schermi trasparenti nel visibile costituiti da film sottile a singolo strato o multistrato oggetto del presente studio, sono caratterizzate dall'efficienza di schermatura definita in precedenza e dalle grandezze descritte nel seguito.

Nel caso di schermi elettromagnetici sottili, aventi spessore d che soddisfi la condizione:

$$d \leq 3\delta \quad (5.1)$$

essendo δ la profondità di penetrazione attraverso il materiale schermante, l'efficienza di schermatura assume il valore costante SE_0 espresso da:

$$SE_0 = 45,51 + 20 \log (\sigma d) \quad (5.2)$$

essendo σ il valore della conducibilità effettiva equivalente del mezzo che realizza lo schermo espressa in S/m e d espresso in metri. Si noti che la quantità che compare ad argomento della (5.2) rappresenta l'inverso della resistenza superficiale (sheet-resistance) del film schermante espressa in ohm/square:

$$R_{sheet} = \frac{1}{\sigma d} \quad (5.3)$$

L'approssimazione $SE \cong SE_0$ vale a partire da frequenza nulla fino alla frequenza massima f_{max} alla quale la condizione (5.1) è soddisfatta:

$$f_{max} = \frac{9}{\mu_0 \pi \sigma d^2} \quad (5.4)$$

In generale per schermi non elettricamente sottili il valore SE_0 rappresenta il valore minimo della SE a radiofrequenza e coincide con il valore limite di SE per frequenza tendente a zero.

Le precedenti espressioni valgono nel caso di schermo omogeneo. Nel caso di schermo selettivo in frequenza il campo trasmesso deve essere rilevato nella zona di campo lontano a valle dello schermo. La stima dell'efficienza di schermatura a bassa frequenza, ovvero del parametro SE_0 può essere effettuata secondo la formula (5.2) soltanto nel caso di superfici selettive in frequenza (FSS) di tipo induttivo, sostituendo al parametro σ la conducibilità effettiva della FSS ottenuta come media pesata delle conducibilità elettriche delle diverse tipologie di superfici schermanti, pesate dalle aree da esse occupate.

Le proprietà di trasparenza ottica sono caratterizzate mediante il coefficiente di trasmittanza ottica nel visibile (T), considerato per incidenza normale e lunghezze d'onda comprese tra circa 400 nm e circa 800 nm. Tale parametro è esprimibile in valore percentuale mediante la seguente relazione:

$$T = (E^t/E^i) \cdot 100 \quad (5.5)$$

in cui E^t ed E^i sono rispettivamente le ampiezze del campo elettrico trasmesso ed incidente.

La trasmittanza media del visibile per incidenza normale, pesata dalla curva di sensibilità dell'occhio umano (T_{av}), è definita dalla seguente grandezza:

$$T_{av} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} T(\lambda) r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} r(\lambda) d\lambda} \quad (5.6)$$

dove $r(\lambda)$ rappresenta la curva di sensibilità dell'occhio umano:

$$r(\lambda) = \exp\left[-2(\lambda - \lambda_0)^2 / W^2\right] \quad (5.7)$$

in cui $\lambda_{min}=440$ nm, $\lambda_{max}=780$ nm, $\lambda_0=555$ nm, $W=83$ nm. La figura 5.1 mostra la curva di risposta dell'occhio umano in funzione della lunghezza d'onda.

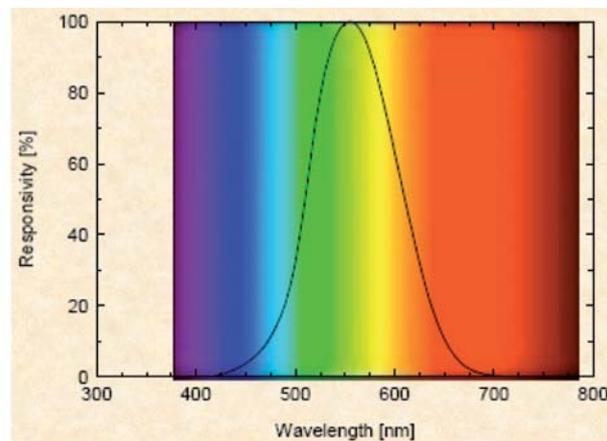


Figura 5.1 - Curva di risposta dell'occhio umano in funzione della lunghezza d'onda.

L'isotropia delle proprietà ottiche del rivestimento schermante sono descritte dal seguente parametro:

$$T_{obl}(\lambda_c) = \frac{2}{\pi T(\lambda_c; 0)} \int_0^{\theta_{max}} T(\lambda_c; \theta) d\theta \quad (5.8)$$

che rappresenta la trasmittanza media normalizzata per diversi angoli di incidenza tra 0° (incidenza normale) e l'angolo θ_{max} , calcolata alla frequenza centrale del visibile, ovvero per lunghezza d'onda $\lambda_c=550$ nm.

I vetri installati nelle aperture presenti in edifici o sistemi di trasporto (automobili, treni, aerei, navi, ecc.) possono essere costruiti in modo da presentare un'efficienza di schermatura diversa da zero. A tale scopo si possono utilizzare griglie metalliche che vengono inserite in matrici polimeriche o in strutture multistrato in vetro, polveri metalliche disperse in matrici di vetro o plastica, od anche film sottili di ossidi di semiconduttori, quali ossido di indio (ITO) o ossido di zinco (ZnO), che vengono depositi su substrati di vetro o plastica, o infine film sottili nanostrutturati multistrato di tipo metallo-dielettrico o metallo-semiconduttore, su substrati di vetro o plastica, noti come metalli trasparenti.

I pannelli termici hanno la finalità di mantenere il calore all'interno della struttura d'inverno e di espellerlo durante l'estate; per ottenere queste prestazioni, vengono ricoperti con un sottilissimo strato di metallo che attenua le frequenze nell'infrarosso ma che risulta opaco per le microonde. Si possono realizzare fori sottili sulla superficie dello strato metallico in modo da permettere il passaggio delle microonde e lasciare inalterate le proprietà della finestra nell'infrarosso e nel visibile. Di seguito vengono illustrate le prestazioni delle varie tipologie di schermi elettromagnetici trasparenti.

5.1 Vetri con griglie metalliche

Uno schermo a griglia metallica è generalmente composto da due substrati trasparenti dielettrici tra i quali viene inserita una griglia di materiale conduttore utilizzando una colla particolare. L'efficienza di schermatura dipende essenzialmente dallo spessore del materiale e dalla sua conducibilità, e naturalmente varia con la frequenza.

La profondità di penetrazione del campo elettromagnetico incidente all'interno dello schermo diminuisce all'aumentare della conducibilità del materiale determinando un aumento dell'efficienza di schermatura: aumentano i coefficienti di attenuazione e di riflessione dello schermo. E' necessario, quindi, che la griglia sia di materiale buon conduttore come rame o argento, e che inoltre abbia uno spessore sufficientemente sottile, dell'ordine dei micrometri, in modo da garantire una buona trasmittanza del campo elettromagnetico alle frequenze ottiche. La *SE* dipende inoltre dalla struttura della griglia, ovvero dalla sua geometria, generalmente di sezione quadrata, e dalla periodicità delle aperture indicata con p in figura 5.1.1. Una griglia può avere microfilm di rame di spessore 0,02-0,08 inch ed un numero di aperture per inch compreso tra 50 e 100. La struttura determina il modo in cui il campo incidente "vede" lo schermo, creando o meno le condizioni per una schermatura ottimale: la penetrazione del campo elettromagnetico attraverso le aperture è tanto più elevata quanto più la sua lunghezza d'onda è confrontabile con la dimensione delle stesse aperture.

La *SE* può presentare valori fino a 40 dB - 50 dB; la semplicità di costruzione della griglia, che non necessita di particolari tecniche di deposizione, rende i costi alquanto contenuti. La griglia di microfilari riduce la trasmittanza nel visibile e la flessibilità dello schermo rendendone difficoltoso l'uso su superfici non planari.

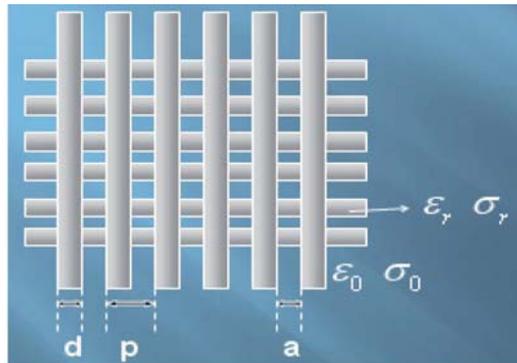


Figura 5.1.1 - Esempio di griglia metallica.

5.2 Vetri con film sottili

Lo schermo a film sottile è tipicamente composto da un substrato, che può essere costituito da diversi tipi di materiale dielettrico con uno spessore dell'ordine del millimetro, sul quale viene depositato con varie tecniche un sottilissimo strato nanometrico di ITO o di ZnO.

La *SE* di vetri con ITO è in generale non superiore a 30 dB a causa del valore della resistività dell'ITO: è stata misurata un'efficienza di schermatura massima di 33 dB con uno spessore ed una resistività di ITO pari rispettivamente a $d_{ITO} = 0.5 \text{ nm}$ e $\rho_{ITO} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$. Si deve rilevare tuttavia che l'ITO garantisce un'elevata trasmittanza nel campo del visibile, pur presentando problemi di distorsione cromatica in funzione dell'angolo di visuale, con un costo relativamente contenuto. Va osservato, infine, che le caratteristiche elettriche del film sottile devono conservarsi nel tempo al fine di garantire le volute prestazioni schermanti: a tale riguardo svolge un ruolo fondamentale la tecnica di deposizione del film utilizzata in laboratorio.

5.3 Vetri con metalli trasparenti

L'inserimento di un sottilissimo strato di metallo, ad esempio argento (Ag), tra due strati di ITO, secondo la rappresentazione di figura 5.3.1, riduce la resistenza elettrica dello schermo in quanto il metallo cortocircuita i due strati di semiconduttore, e quindi aumenta la *SE*; la diminuzione della trasmittanza nel visibile causata dalla riflessione e dall'assorbimento del metallo viene contenuta grazie allo strato semiconduttivo iniziale, che agisce come un antiriflettente.

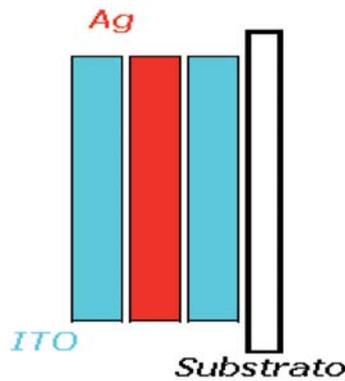


Figura 5.3.1 - *Struttura di un metallo trasparente.*

L'argento è il metallo preferito poiché la risonanza del suo plasma, situata a circa 320 nm, lo rende più adatto alla trasmissione nel visibile di altri materiali conduttori come ad esempio l'alluminio o l'oro ed il rame i quali sembrano lavorare meglio con lunghezze d'onda maggiori. L'ITO, che realizza lo strato non conduttore, è caratterizzato da un più alto indice di rifrazione rispetto allo ZnO.

La *SE* dello schermo trasparente multistrato dipende dal valore della "sheet resistance" a sua volta funzione dello spessore dello strato di metallo: aumentando lo spessore diminuisce la resistenza, con un aumento della *SE*, ma diminuisce anche la trasmittanza nel visibile. Nel corso delle ricerche si è scoperto che sostituendo il singolo strato metallico con una particolare struttura metallo-dielettrico (M-D) dello stesso spessore del metallo, nota come metallo trasparente, si riesce ad incrementare la trasmittanza nel visibile. Il metallo trasparente è caratterizzato da una struttura periodica costituita da strati aventi indice di rifrazione elevato per il dielettrico o il semiconduttore e basso per il metallo. Grazie alla geometria periodica la luce riesce a propagarsi attraverso l'intera struttura in un determinato intervallo di frequenza. Per ottenere una maggiore *SE* in un più ampio intervallo di frequenza, si preferisce utilizzare un materiale semiconduttore al posto del dielettrico (struttura M-S) a causa della minore resistività del semiconduttore.

I metalli trasparenti possono essere utilizzati per realizzare schermi selettivi in frequenza, che presentano una struttura periodica composta da materiale conduttore e aperture secondo geometrie differenti a seconda delle volute prestazioni. La risposta in frequenza dello schermo dipende dallo spessore e dalla forma (circolare, rettangolare, ecc.) del materiale e dalla periodicità delle aperture.

5.4 Tecniche di deposizione di film sottili

Per depositare un film sottile su un substrato si possono utilizzare le seguenti tecniche: evaporazione termica, evaporazione a fascio elettronico, *sputtering*. In ognuna di queste tecniche il materiale da deporre (target) passa dal suo iniziale stato solido a quello di vapore, per poi essere condensato direttamente sulla superficie di deposizione.

Le due tecniche di evaporazione utilizzano il riscaldamento (deposizione fisica a vapore – PVD), mentre la tecnica di *sputtering* si avvale del processo di bombardamento da parte di ioni

gassosi. Di seguito si descrivono le sole tecniche prevalentemente utilizzate per la deposizione dell'ITO.

5.4.1 Tecnica di sputtering

La tecnica di *sputtering* consiste nel bombardamento del materiale da depositare (target) con ioni che causano il distacco di atomi o molecole, le quali successivamente vanno a depositarsi sul substrato. Le particelle arrivano sul substrato con un'energia maggiore rispetto a quella posseduta con le tecniche di evaporazione, permettendo alcuni significativi vantaggi quali un migliore sfruttamento del materiale, una più ampia scelta dei materiali e dei substrati, un controllo maggiore dello spessore ed una migliore aderenza del film al substrato.

La procedura di deposizione avviene all'interno di una camera da vuoto, che può giungere ad una pressione interna di 10^{-7} mbar, nella quale vengono disposte due piastre a forma di disco in posizione orizzontale, distanti tra loro poco più di un centimetro, costituite l'una del materiale target e l'altra dal substrato. All'interno della camera viene immesso, per mezzo di una valvola, gas (Argon o Xenon) di purezza elevatissima, ad una pressione di 10^{-4} mbar; il gas una volta ionizzato genera gli ioni che vanno a bombardare il target. Aumentando la tensione tra anodo e catodo, aumenta l'energia fornita alle particelle, con un aumento del numero di ioni disponibili per il bombardamento, secondo la teoria di Townsend. Il target viene successivamente raffreddato per eliminare l'energia in eccesso che non è stata ceduta agli ioni, così da evitare il danneggiamento dello stesso a causa dell'aumento di temperatura che può essere dell'ordine dei 200° C. Lo stesso raffreddamento viene applicato anche al disco porta substrato. Per poter valutare l'efficienza della deposizione, si introduce il parametro "*resa di sputtering*" S , definito come il numero di atomi prelevati dalla superficie del target da uno ione incidente.

La tecnica permette l'utilizzo di un ampio numero di target disponibili in commercio di elevata purezza, di metallo, di leghe od anche di ossidi di semiconduttore.

La tecnica di *sputtering* presenta numerose varianti, a seconda della configurazione adottata: *sputtering* con tensione continua (*DC*), *sputtering* a radio frequenza (*RF*), magnetron *sputtering*, *Dual ion beam sputtering* (*DIBS*).

Sputtering DC

In questa configurazione il polo negativo dell'alimentatore è connesso al catodo (target), quello positivo invece è posto alla piastra porta substrati (anodo) e a massa delle parti metalliche della camera. Applicando un'elevata tensione continua, si genera una scarica luminosa tra i due elettrodi costituita da plasma di ioni Argon (Ar^+) ed elettroni. La caduta di tensione si manifesta principalmente in una zona spessa fino a 20 mm, vicina al target, nella quale gli elettroni e gli ioni vengono accelerati rispettivamente verso il target e la regione di plasma, producendo altri ioni per urto. Gli ioni che bombardano il target estraggono atomi i quali attraversando la regione di plasma si depositano sui substrati. Dal target inoltre vengono emessi elettroni secondari che contribuiscono a mantenere il gas ionizzato, così da raggiungere una situazione di equilibrio.

Sputtering RF

Questa tecnica permette di superare i limiti presenti nella tecnica *DC*: infatti utilizzando come target alcuni materiali isolanti, gli ioni che bombardano la sua superficie apporterebbero una carica positiva tale da creare una differenza di potenziale in grado di annullare la tensione applicata dall'esterno, facendo terminare il bombardamento. La frequenza usata è di 13,56 MHz

con una potenza compresa tra 200 e 1000 W. Applicando una tensione alternata con picco di alcune migliaia di Volt in ogni semiperiodo i due elettrodi si comportano alternativamente come anodo e catodo, venendo bombardati da elettroni e da ioni. Aumentando la frequenza della tensione, gli ioni, più pesanti degli elettroni e quindi meno mobili, non riescono a transitare dalla regione di plasma agli elettrodi, al contrario degli elettroni. Per questa ragione gli elettrodi assumono un potenziale medio negativo rispetto a quello del plasma; anche in questo caso, la differenza di potenziale si manifesta principalmente nella zona oscura dove non si verifica il bagliore di scarica.

Magnetron Sputtering

Le due tecniche di *sputtering* sopra esposte presentano alcuni inconvenienti, ovvero una bassa velocità di deposizione ed un elevato riscaldamento del substrato a causa del bombardamento. Queste limitazioni si possono superare montando dietro il target un magnete permanente in maniera tale da riuscire a creare un campo magnetico (generalmente di 0.02 – 0.1 T) parallelo alla superficie del target stesso ed ortogonale al campo elettrico. A causa dell'azione combinata della forza di Lorentz con quella del campo elettrico, nella zona prossima al target gli elettroni secondari deflettono assumendo una traiettoria elicoidale. All'interno del plasma il campo elettrico è trascurabile e, a causa dell'effetto del campo magnetico, gli elettroni descrivono orbite circolari senza più riuscire a raggiungere l'anodo ed i substrati. In tal modo si ottiene sia la diminuzione del riscaldamento del substrato sia un aumento della probabilità di ionizzazione del gas a causa dell'"intrappolamento" degli elettroni nel plasma, con conseguente aumento della velocità di deposizione.

Dual Ion Beam Sputtering (DIBS)

Usando i tipi di *sputtering* descritti, gli atomi della sorgente assumono un livello energetico pari a 10 eV (dieci volte superiore a quello assunto con l'evaporazione termica), il quale potrebbe non essere sufficiente per depositare film in grado di sopportare particolari condizioni gravose che potrebbero verificarsi in determinate applicazioni pratiche. Per alcune applicazioni potrebbe essere richiesta una deposizione a bassa temperatura che può essere realizzata con la tecnica DIBS, la più utilizzata per la composizione di metalli trasparenti. Tale tecnica consente il controllo dello spessore del film mantenendo una temperatura dell'ordine dei 10°C, riuscendo a portare gli atomi ad un livello energetico di centinaia di eV. La figura 5.4.1 rappresenta in modo schematico i componenti della camera per la deposizione.

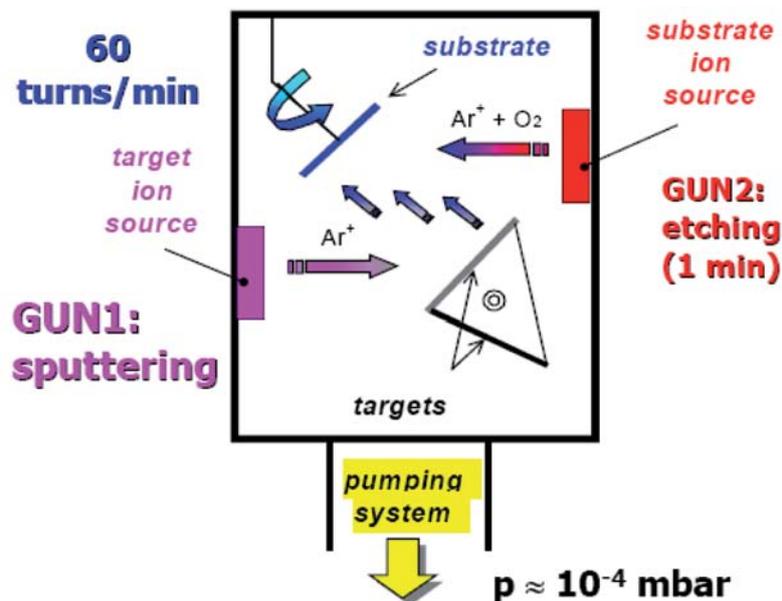


Figura 5.4.1 - Camera per la deposizione.

Nella camera di vuoto sono presenti due sorgenti di fasci ionici di Argon (Ar^+), il substrato ed il target. Ad una sorgente (*substrate ion source*) è affidato il compito di colpire il substrato prima dell'inizio della deposizione per pulire la superficie, così da avere un'ottima adesione. Il substrato viene posto in rotazione per garantire la massima uniformità dello spessore del film; nel contempo, gli ioni della seconda sorgente (*target ion source*) colpiscono gli atomi del target i quali, eccitati dall'energia cinetica, migrano verso il substrato dove avviene la deposizione del film. Per la realizzazione di multistrati non è necessaria l'interruzione del processo in quanto i materiali costituenti il film sono posti su base rotante. La pressione in camera inizialmente è prossima a 10^{-5} Pa; successivamente, durante il processo, la pressione giunge fino a 10^{-3} Pa, valore mantenuto costante per mezzo del controllo del flusso di gas introdotto in camera.

La tecnica *DIBS* è stata individuata come ottimale per la realizzazione dei campioni di schermo trasparente per diversi motivi. Innanzitutto è una metodologia di deposizione che, a differenza di tecniche largamente diffuse quali l'elettrodeposizione, la verniciatura spray o il plasma spray, consente di realizzare film sottili dello spessore anche della frazione di nanometro. Si possono utilizzare substrati plastici, i cui rivestimenti possono essere realizzati con materiali conduttori, dielettrici o semiconduttori. La tecnica *DIBS* è altresì molto versatile, in quanto permette la deposizione di più materiali in uno stesso processo, risultando quindi particolarmente indicata per la realizzazione di film multistrato costituiti dalla sequenza periodica di rivestimenti in materiale conduttore e non. Si tratta, inoltre, di un metodo di deposizione a freddo, in quanto la temperatura durante il processo può salire di alcune decine di gradi appena (generalmente è intorno ai $50^\circ C$). Tale aspetto è di notevole importanza: infatti è possibile utilizzare substrati polimerici o plastici perché, se anche il numero di periodi della struttura è elevato, i tempi di deposizione possono essere lunghi e in generale dipendono dal tipo di materiale che si intende depositare. Ad esempio, per il rame si ha un tasso di crescita medio di 0.21 nm/s, mentre per il nickel di circa 1.13 nm/s.

Rispetto ad altre tecniche *PVD*, quali ad esempio lo *sputtering* a radiofrequenza o il *magnetron sputtering*, il *DIBS* consente di realizzare rivestimenti con migliore adesione grazie all'azione di attivazione della superficie del substrato effettuata da uno dei due cannoni ionici prima della deposizione del film (fase di etching del substrato).

La realizzazione mediante *DIBS* di rivestimenti con caratteristiche elettromagnetiche e meccaniche ottimali dipende fortemente dai parametri di deposizione, quali ad esempio pressione nella camera a vuoto, temperatura, potenza associata al fascio ionico, densità di argon, ecc. E' necessaria, pertanto, una notevole esperienza nel settore per garantire l'ottima riuscita della struttura multistrato.

L'adesione su substrati plastici o polimerici di rivestimenti sottili multistrato è critica a causa della presenza di tensioni superficiali di interfaccia che possono causare il distacco del film. E' necessario, pertanto, definire con cura particolare i parametri di deposizione al fine di minimizzare le tensioni di interfaccia.

6 Funzionamento di dispositivi elettromagnetici wireless in ambiente indoor

I dispositivi wireless attualmente in commercio sono progettati per funzionare rispettando i limiti di emissione delle normative in vigore nei paesi in cui sono commercializzati. Tali dispositivi, inoltre, devono rispondere a criteri ben definiti di compatibilità ambientale ed elettromagnetica ed essere opportunamente certificati. Nel caso in cui un dispositivo wireless si dovesse trovare in un ambiente schermato, il suo funzionamento potrebbe essere alterato qualora la sorgente elettromagnetica di cui necessita per operare correttamente subisca gli effetti della schermatura (ad esempio, un cellulare in un edificio schermato e la relativa stazione radiobase all'esterno). Di contro i dispositivi il cui collegamento non è interessato dall'attenuazione introdotta da un eventuale schermo non dovrebbero accusare ridotte capacità di funzionamento (reti WiFi, WLAN, ecc.).

Qualora se ne preveda l'uso indoor, il loro funzionamento sarà subordinato ai livelli di campo e di potenza tipicamente presenti in tali ambienti, nonché alle distribuzioni spaziali e temporali delle mappe di campo stesse, ovviamente dipendenti di volta in volta da caratteristiche peculiari delle strutture in esame. Il funzionamento dei dispositivi wireless in ambienti indoor può diventare difficoltoso o non ottimale nel caso in cui i livelli di campo o di potenza ricevuta si rivelino insufficienti a soddisfare le specifiche di funzionamento, ovvero se la qualità del segnale presente risulti eccessivamente degradato. Tuttavia tali dispositivi, essendo stati progettati per operare nel rispetto dei limiti di esposizione ed emissione previsti dalle normative, non presentano generalmente problemi di funzionamento in ambienti in cui la schermatura del campo non venga spinta a livelli estremi, come ad esempio camere schermate o gabbie di Faraday.

7 Requisiti di progetto di nuovi vetri schermanti

Le diverse tipologie di vetri schermanti disponibili in commercio, descritte nelle precedenti sezioni di questo rapporto, presentano limitazioni nelle prestazioni fortemente legate alla tecnologia realizzativa.

Nel caso di vetri multistrato contenenti griglie metalliche, i limiti principali sono la trasmittanza ottica ridotta e la non uniformità macroscopica dello schermo che ne penalizza fortemente l'aspetto estetico.

Per i vetri caricati con polveri conduttive (tipicamente a base di oro), si riscontrano costi elevati, risoluzione cromatica non neutrale e difficoltà di messa a massa dello schermo ai fini dell'ottimizzazione della prestazione schermante.

Relativamente ai vetri con rivestimenti in ITO, si ha una ridotta prestazione schermante rispetto alle soluzioni sopramenzionate, nonché una difficoltà nella messa a massa dello schermo qualora il rivestimento in ITO non sia esterno.

I limiti di schermi trasparenti commerciali possono essere superati mediante il progetto di schermi metallici trasparenti, realizzati da film multistrato costituiti dalla sequenza di strati nanometrici di materiale conduttore e dielettrico o semiconduttore. Allo stato attuale dell'arte, tali schermi nanostrutturati hanno prestazioni schermanti a radiofrequenza e, allo stesso tempo, prestazioni ottiche decisamente competitive rispetto a quelle dei vetri schermanti disponibili in commercio.

Tuttavia, è da evidenziare come tutte le tecniche di schermatura sopra descritte siano carenti dal punto di vista delle proprietà di "self-cleaning" della superficie vetrata e che inoltre non presentano prestazioni elettromagnetiche selettive in frequenza. La selettività in frequenza potrebbe essere infatti realizzata al fine di garantire prestazioni schermanti non costanti in tutta la banda di frequenza, al fine di consentire l'ottimo utilizzo di sistemi di comunicazioni wireless in opportuni intervalli di frequenza.

L'obiettivo del presente studio consiste nella realizzazione di schermi per radiofrequenza trasparenti nel visibile per superfici vetrate in edifici che soddisfino le specifiche descritte di seguito.

In primo luogo, l'installazione dello schermo deve garantire valori di campo elettromagnetico all'interno dell'edificio che garantiscano il rispetto dei limiti previsti dalla normativa, ma allo stesso tempo consentano l'utilizzo di dispositivi di comunicazione wireless quali telefoni cellulari, sistemi wireless per la domotica. La trasmittanza ottica nel visibile e la risoluzione cromatica dello schermo devono essere tali da garantire un adeguato livello di confort all'interno dell'edificio. Nel caso in cui le superfici vetrate schermanti costituiscano le tamponature esterne di edifici, risulta auspicabile che lo schermo abbia proprietà multifunzionali, quali in particolare capacità autopulenti, proprietà fonoassorbenti, proprietà di schermatura termica. Infine, qualora lo schermo sia installato su superfici non planari, le proprietà di elevata trasparenza ottica nel visibile devono essere garantite anche per incidenza non perfettamente normale.

Gli schermi oggetto del presente studio dovranno soddisfare i requisiti di seguito elencati.

- 1) Efficienza di schermatura di campi elettromagnetici a radio frequenza nell'ipotesi di onda piana e incidenza normale:
 - Per vetri commerciali modificati: 30-40 dB, per frequenze comprese tra 1 MHz e 6 GHz;
 - Per vetri in metallo trasparente nanostrutturato: 40 dB per frequenze comprese tra 1 MHz e 6 GHz.
- 2) Trasmittanza ottica media nel visibile per incidenza normale, pesata dalla curva di sensibilità dell'occhio umano (T_{av}):
 - Per vetri commerciali modificati: 50-70%;
 - Per vetri in metallo trasparente nanostrutturato: superiore a 60%.
- 3) Trasmittanza ottica media al variare dell'angolo di incidenza tra 0° e $\theta_{max}=60^\circ$ alla frequenza centrale del visibile, pesata dalla curva di sensibilità dell'occhio umano (T_{obl}):
 - Per vetri in metallo trasparente nanostrutturato: superiore a 50 dB.
- 4) Fattore di trasmissione dell'energia solare: minore del 40%.

8 Conclusioni

Le indagini svolte sui livelli di campo critici in ambiente urbano mediante simulazione e utilizzando dati ottenuti sperimentalmente per il monitoraggio di siti diversi mettono in evidenza l'aspetto cruciale rappresentato dalle finestre, o comunque da pareti in vetro, presenti negli edifici.

Le tecniche di copertura del territorio per telefonia cellulare sono state sviluppate tenendo conto in misura crescente del vincolo di rispetto del limite di 6 V/m e pertanto dovrebbero in generale permettere l'uso di aperture non protette dalla schermatura elettromagnetica. Naturalmente non si devono escludere situazioni di esposizione critica dovute a particolari condizioni di vicinanza con stazioni radio base.

Situazioni di maggiore attenzione sono rappresentate da emittenti radiotelevisive: pertanto è necessario tenere conto del campo di frequenza, della potenza e delle condizioni di irradiazione di queste sorgenti ai fini del progetto di vetri schermanti.

Particolare interesse rivestono i dati relativi all'attenuazione del campo elettromagnetico prodotta da materiali da costruzione; in altri termini, nel progetto di schermatura elettromagnetica di un edificio, oltre a riferirsi alle aperture, si deve tenere conto del livello di penetrazione del campo elettromagnetico attraverso le pareti. Va comunque rilevato che i telefoni cellulari sono in grado di funzionare anche se il campo viene ridotto al di sotto di 1 V/m a seguito di schermatura delle aperture.

In conclusione sono stati definiti i requisiti richiesti per il progetto di vetri caratterizzati da fissate prestazioni di attenuazione del campo elettromagnetico di radiofrequenza incidente su edifici in ambiente urbano.

Riferimenti bibliografici

- [1] M. D'Amore, "*Compatibilità Elettromagnetica*", Edizioni Scientifiche Siderea, 2003.
- [2] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "*Innovative Test Method for the Shielding Effectiveness Measurement of Conductive Thin Films in a Wide Frequency Range*", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.48, NO.2, May 2006
- [3] M.S. Sarto, F. Sarto, M. D'Amore, M.C. Larciprete, M. Scalore, C. Sibilìa, M. Bertolletti, "*Nanotechnology of transparent Metals for Radio frequency Electromagnetic Shielding*", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.45, NO.4, November 2003.
- [4] M.S. Sarto, R.Li Voti, F. Sarto, M.C. Larciprete, "*Nanolayered Lightweight Flexible Shields with Multilayered Optical transparency*", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005.
- [5] Kendall F. Casey, "*Electromagnetic shielding behavior of wire-mesh screens*", IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 30, No 3, August 1988.
- [6] M. Barbiroli, G.Falciasecca, M. Frullone, D. Guiducci, G. Sgorbati, "*Analisi di coperture macrocellulari e microcellulari ai fini della valutazione dell'impatto sull'ambiente*", Gli Approfondimenti di Elettra 2000.
- [7] Norma CEI 211-10 "*Guida per la misura e per la valutazione di campi elettromagnetico nell'intervallo di frequenza compresa tra 10 kHz e 300 GHz*".

-
- [8] NIST Construction Automation Program, Report No.3, “*Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials*”, October 1997.
- [9] R. Hoppe, G. Wolfle, F.M. Landstorfer, “*Measurement of Building Penetration Loss and Propagation Models for Radio Transmission into Buildings*”, IEEE 1999.
- [10] R. Gahleitner, E. Bonek, “*Radio wave Penetration into Urban Buildings in Small Cells and Microcells*”, IEEE 1994.
- [11] A. Davidson, C. Hill, “*Measurement of Building Penetration into Medium Buildings at 900 and 1500 MHz*”, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 46, No.1, Febr. 1997.

APPENDICE A. Teoria della schermatura elettromagnetica

A1. Schermi elettromagnetici piani

Un’onda elettromagnetica in condizioni di campo lontano incide sulla superficie dello schermo in direzione normale: all’interno dello schermo si manifestano fenomeni multipli di riflessione e rifrazione con crescente attenuazione. L’efficienza di schermatura può essere definita utilizzando una teoria analoga a quella che caratterizza le linee di trasmissione [1].

La propagazione delle onde lungo l’asse x è descritta analiticamente dalle seguenti equazioni:

$$(A1.1) \quad \frac{dE}{dx} = (-j\omega\mu) \cdot H$$

$$(A1.2) \quad \frac{dH}{dx} = -(\gamma + j\omega\varepsilon) \cdot E$$

in cui compaiono le grandezze specifiche del materiale costituente lo schermo, μ , γ , ε .

Si rileva un’analogia formale delle equazioni (A1.1), (A1.2) con quelle relative alla propagazione di tensione e corrente nelle linee di trasmissione. Si definiscono impedenza caratteristica e costante di propagazione dello schermo rispettivamente nelle seguenti forme:

$$(A1.3) \quad \eta_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\varepsilon}}$$

$$(A1.4) \quad m_s = \sqrt{j\omega\mu \cdot (\gamma + j\omega\varepsilon)} = \alpha_s + j\beta_s$$

Il campo elettrico trasmesso in “d”, spessore dello schermo, è espresso in funzione di quello incidente in “0”

$$(A1.5) \quad E_d = \frac{\eta_0}{\eta_0 \cosh(m_s d) + \eta_s \sinh(m_s d)} E_0$$

L’impedenza d’ingresso dello schermo vale:

$$(A1.6) \quad \xi_0 = \eta_s \frac{\eta_0 \cosh(m_s d) + \eta_s \sinh(m_s d)}{\eta_s \cosh(m_s d) + \eta_0 \sinh(m_s d)}$$

Con opportuni sviluppi si ricava l'espressione della efficienza di schermatura (SE) definita dal rapporto tra campo incidente e trasmesso, valida per campo elettrico e per campo magnetico, legati dalla impedenza d'onda in aria η_0 nella regione di campo lontano:

$$(A1.7) \quad \frac{H_i}{H_t} = \frac{\eta_0 E_i}{\eta_0 E_t} = \frac{E_i}{E_t} = \frac{(\eta_s + \eta_0)^2}{4\eta_s \eta_0} e^{m_s d} \cdot \left[1 - \left(\frac{\eta_s - \eta_0}{\eta_s + \eta_0} \right)^2 e^{-m_s d} \right]$$

Tale espressione in decibel assume la seguente forma:

$$(A1.8) \quad SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + B_{dB}$$

I tre coefficienti sono:

$$\text{Coefficiente di riflessione} \quad R_{dB} = 20 \log \left| \frac{(\eta_s + \eta_0)^2}{4\eta_s \eta_0} \right| \quad (A1.9)$$

$$\text{Coefficiente di assorbimento} \quad A_{dB} = 20 \log |e^{m_s d}| \quad (A1.10)$$

$$\text{Coefficiente di riflessioni multiple} \quad B_{dB} = 20 \log \left| \left[1 - \left(\frac{\eta_s - \eta_0}{\eta_s + \eta_0} \right)^2 e^{-m_s d} \right] \right| \quad (A1.11)$$

Se lo schermo è buon conduttore $\gamma \gg \omega \epsilon$, si ha:

$$(A1.12) \quad \eta_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\gamma}} \quad m_s = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$$

La costante di attenuazione α_s ed il coefficiente di fase β_s risultano uguali all'inverso della profondità di penetrazione δ_p che rappresenta il percorso per il quale il campo EM subisce l'attenuazione $(1/e)=0,37$:

$$(A1.13) \quad \alpha_s = \beta_s = \frac{1}{\delta_p} = \sqrt{\pi f \mu \gamma}$$

Poiché γ è molto elevato, risulta inoltre $\eta_s \ll 1$ da cui:

$$(A1.14) \quad |e^{m_s d}| = e^{\alpha_s d} = e^{\frac{d}{\delta_p}}$$

Se lo schermo ha anche uno spessore d molto maggiore della profondità di penetrazione (schermo elettricamente spesso), risulterà $e^{\frac{d}{\delta_p}} \ll 1$; si può trascurare il coefficiente B.

Esplicitando le espressioni dei coefficienti R ed A per schermi elettricamente spessi, si ottiene:

$$(A1.15) \quad R_{dB} = 20 \log \frac{\eta_0}{4\eta_s} = 39,48 - 10 \log \eta_s = 31,49 - 10 \log \frac{\mu f}{\gamma}$$

$$(A1.16) \quad A_{dB} = \frac{d}{\delta_p} 20 \log e = 8,69 \frac{d}{\delta_p} = 15,4 \cdot d \cdot \sqrt{\mu f \gamma}$$

A2. Schermi multistrato

Si consideri uno schermo composto da n strati piani supposti indefiniti ognuno dei quali ha spessore d_j impedenza caratteristica η_{sj} e costante di propagazione m_{sj} .

Si indichino con H_i, E_i i vettori di campo incidenti e con H_t, E_t quelli di campo trasmessi, entrambi caratterizzati dalla stessa impedenza d'onda Z_W .

Il rapporto tra campo magnetico trasmesso dallo strato j-esimo e da quello j-1 vale [1]:

$$(A2.1) \quad \frac{H_j}{H_{j-1}} = \frac{\eta_{sj}}{\eta_{sj} \cosh(m_{sj} d_j) + \xi_j \sinh(m_{sj} d_j)}$$

con ξ_{j-1} impedenza vista dallo strato j verso destra e pari a:

$$(A2.2) \quad \xi_{j-1} = \eta_{sj} \frac{\xi_j \cosh(m_{sj} d_j) + \eta_{sj} \sinh(m_{sj} d_j)}{\eta_{sj} \cosh(m_{sj} d_j) + \xi_j \sinh(m_{sj} d_j)}$$

L'espressione finale dunque che esprime il rapporto tra campo magnetico trasmesso ed incidente è data da:

$$(A2.3) \quad \frac{H_i}{H_t} = Q \prod_{j=1}^n (1 - q_j e^{-2m_{sj} d_j}) e^{m_{sj} d_j}$$

In cui Q e q valgono rispettivamente:

$$(A2.4) \quad Q = \frac{(Z_W + \eta_{s1})(\eta_{s1} + \eta_{s2}) \cdots (\eta_{sn} + Z_W)}{2Z_W \cdot 2\eta_{s1} \cdot 2\eta_{s2} \cdots 2\eta_{sn}}$$

$$(A2.5) \quad q = \frac{(\eta_{sj} - \eta_{sj-1}) \cdot (\eta_{sj} - \xi_j)}{(\eta_{sj} + \eta_{sj-1}) \cdot (\eta_{sj} + \xi_j)}$$

In definitiva, i coefficienti componenti l'efficienza di schermatura SE assumono le seguenti espressioni [1]:

$$(A2.6) \quad SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + B_{dB}$$

$$(A2.7) \quad R_{dB} = 20 \log \left| \frac{1}{4n} \left(1 + \frac{\eta_{s1}}{Z_W} \right) \cdot \left(1 + \frac{\eta_{s2}}{\eta_{s1}} \right) \cdots \left(1 + \frac{Z_W}{\eta_{sn}} \right) \right|$$

$$(A2.8) \quad A_{dB} = 20 \log \left| e^{m_{s1}d_1} \cdot e^{m_{s2}d_2} \dots e^{m_{sn}d_n} \right|$$

$$(A2.9) \quad B_{dB} = 20 \log \left(1 - q_1 e^{-2m_{s1}d_1} \right) \cdot \left(1 - q_1 e^{-2m_{s2}d_2} \right) \dots \left(1 - q_1 e^{-2m_{sn}d_n} \right)$$

A3. Schermi con aperture

Per il calcolo dell'efficienza di schermatura per uno schermo a griglia metallica composto da uno strato conduttore interposto tra due dielettrici si può adottare lo stesso modello della linea di trasmissione utilizzato per gli schermi multistrato, considerando però la griglia come un unico conduttore continuo equivalente.

La griglia è caratterizzata dalle seguenti grandezze: periodicità (p) e numero di aperture per inch; materiale e spessore (d) dei singoli fili; struttura geometrica.

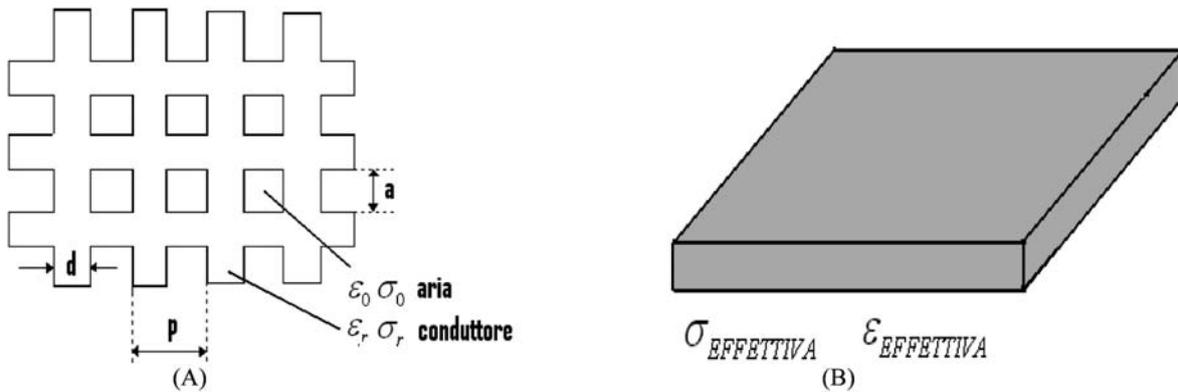


Figura A2.1 - Schematizzazione della griglia (A) e conduttore equivalente (B).

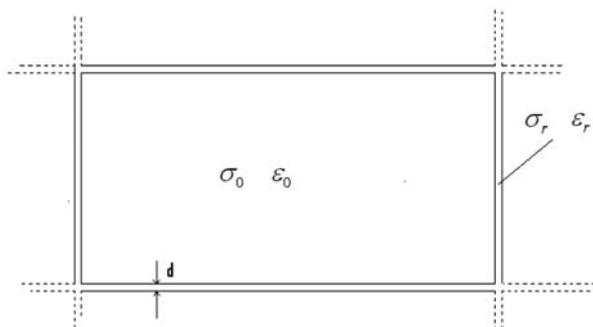


Figura A2.2 - Particolare della griglia

Nota la conducibilità del materiale componente i fili e nota la conducibilità dell'aria presente all'interno degli spazi vuoti creati dalla geometria della griglia, è possibile valutare un fattore k funzione dello spessore e della geometria della griglia, il quale, moltiplicato per la conducibilità del materiale consente di calcolare il valore di conducibilità da attribuire al conduttore equivalente di figura A2.1 (b).

APPENDICE B. Limiti di campo elettromagnetico a radio frequenza previsti dalle normative

In questo paragrafo si riportano i principali riferimenti normativi internazionali relativi ai limiti di esposizione a radiazioni non ionizzanti, comprese le raccomandazioni della Comunità Europea e le linee guida dell'ICNIRP.

B1. Normativa internazionale

L'ICNIRP, la commissione internazionale per la protezione da radiazioni non ionizzanti, è costituita da un organico comprendente esperti scientifici indipendenti; nata dapprima come semplice Associazione Internazionale (IRPA), collabora con la divisione dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), ed ha lo scopo di esaminare le problematiche derivanti dall'esposizione della popolazione a campi elettromagnetici.

In particolare, per quel che riguarda l'esposizione a campi elettromagnetici variabili con frequenza massima di 300 GHz, questa commissione ha pubblicato le Linee Guida (Health Physics, vol. 74, n. 4 Aprile 1998) all'interno delle quali viene fornita una panoramica delle caratteristiche fisiche, dei metodi e strumenti di misura, delle sorgenti e delle applicazioni delle Non Ionizing Radiations (NIR), insieme ad un'approfondita rassegna della letteratura sugli effetti biologici e ad una valutazione dei rischi sanitari all'esposizione del NIR.

Tale informazioni hanno creato la base scientifica per il successivo sviluppo di limiti di esposizione e di codici di comportamento nei riguardi delle NIR.

All'interno delle linee guida della commissione, vengono fornite sia le restrizioni di base per l'esposizione, fondate su effetti sanitari accertati, sia i livelli di riferimento per le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'individuo esposto.

In particolare, per le restrizioni di base, si definiscono i valori limite di densità di corrente tra 1 e 10 MHz, della densità di corrente e del SAR tra 100 kHz e 10 GHz, e della densità di potenza tra 10 e 300 GHz per prevenire un eccessivo riscaldamento dei tessuti superficiali del corpo, come mostrato dalle tabelle B1.1-B1.4.

Tabella B1.1 - Restrizioni di base per campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, con frequenze comprese tra 0 e 10 GHz (ICNIRP).

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Densità di corrente per la testa ed il tronco (mA/m ²)(rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
Esposizione professionale	fino a 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
Esposizione del pubblico	fino a 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Tabella B1.2 - Restrizioni di base per frequenze comprese tra 10 e 300 GHz (ICNIRP).

Caratteristiche dell'esposizione	Densità di potenza (W/m ²)
Esposizione professionale	50
Esposizione del pubblico	10

Tabella B1.3 - Livelli di riferimento (valori efficaci) per l'esposizione professionale (ICNIRP).

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S _{eq} (W/m ²)
fino a 1 Hz	-	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	-
1-8 Hz	10.000	3,2 x 10 ⁴ /f ²	4 x 10 ⁴ /f ²	-
8-25 Hz	10.000	4.000/f	5.000/f	-
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	-
1-10 MHz	87/f ^{1/2}	0,73/f	0,92/f	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	1,375f ^{1/2}	0,0037f ^{1/2}	0,0046f ^{1/2}	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabella B1.4 - Livelli di riferimento (valori efficaci) per l'esposizione del pubblico (ICNIRP).

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S _{eq} (W/m ²)
fino a 1 Hz	-	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	-
1-8 Hz	20.000	1,63 x 10 ⁵ /f ²	2 x 10 ⁵ /f ²	-
8-25 Hz	20.000	2 x 10 ⁴ /f	2,5 x 10 ⁴ /f	-
0,025-0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
0,82-65 kHz	610	24,4	30,7	-
0,065-1 MHz	610	1,6/f	2,0/f	-
1-10 MHz	610/f	1,6/f	2,0/f	-
10-400 MHz	61	0,16	0,2	10
400-2000 MHz	3f ^{1/2}	0,008f ^{1/2}	0,01f ^{1/2}	f/40
2-300 GHz	137	0,36	0,45	50

In ambito europeo, un ruolo predominante è rivestito dalla *Direttiva 2004/40/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 29 aprile 2004*, sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici - campi elettromagnetici (diciottesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1 della direttiva 89/391/CEE).

A partire poi dall'art. 152 par. 4 comma II del trattato che istituisce la Comunità Europea, considerando che tale trattato contempla inoltre nell'art.3 lettera p) un'azione mirata al conse-

guimento di un elevato livello di protezione della salute, e tenendo presente la risoluzione del 5 maggio 1994 sulla lotta contro gli effetti nocivi delle radiazioni non ionizzanti, nasce la *Raccomandazione 1999/512/CE del 12 luglio 1999* pubblicata sulla G.U.C.E n. L199 del 30/07/1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz.

Secondo quanto stabilito in essa, tutti gli stati membri sono tenuti a rispettare i limiti fondamentali ed i livelli di riferimento di differenti grandezze forniti negli allegati della stessa, in particolare relativamente alle attività che implicano l'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici per un tempo significativo.

In particolare, vengono fissati sia i "limiti di base" (tabella B1.5) da non superare, fondati direttamente su effetti sulla salute accertati sperimentalmente, sia i "livelli di riferimento" (Tabella B1.6) indicati per valutare l'esposizione in modo da determinare la probabilità di un eventuale superamento dei limiti di base.

Tali limiti di riferimento vengono comunque adottati soltanto sulla base di effetti accertati; tuttavia, esistendo fattori di sicurezza di ordine 50 tra i valori limite per gli effetti acuti ed i limiti di base, la raccomandazione implicitamente contempla anche gli eventuali effetti a lungo termine nell'intervallo di frequenza.

Tabella B1.5 - *Limiti di base per l'esposizione della popolazione per frequenze comprese tra 0 Hz e 300 GHz (Raccomandazione Europea).*

GAMMA DI FREQUENZA	DENSITA' DI FLUSSO MAGNETICO (mT)	DENSITA' DI CORRENTE (mA.m2) (rms)	SAR MEDIATO SUL CORPO INTERO (W/kg)	SAR LOCALIZZATO (CAPO E TRONCO) (W/kg)	SAR LOCALIZZATO (ARTI) (W/kg)	DENSITA' DI POTENZA S (W/m2)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
>0 - 1 Hz	-	8	-	-	-	-
1 - 4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4 - 1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1000 - 100 kHz	-	#500	-	-	-	-
100 kHz - 10 MHz	-	#500	0,08	2	4	-
10 MHz - 10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 - 300 GHz	-	-	-	-	-	10

Tabella B1.6 - Livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione (valori efficaci) per frequenze compresi tra 0 Hz e 300 GHz (Raccomandazione Europea).

INTERVALLO DI FREQUENZA	INTENSITA' DI CAMPO E (V/m)	INTENSITA' DI CAMPO H (A/m)	CAMPO B (μ T)	DENSITA' DI POTENZA AD ONDA PIANA EQUIVALENTE Seq
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 - 8 Hz	10000	$3,2 \times 10^4 / f$	$4 \times 10^4 / f^2$	-
8 - 25 Hz	10000	$4000/f$	$5000/f$	-
0,025 - 0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8 - 3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3 - 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 - 1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1 - 10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10 - 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 - 2000	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$0,0046f^{1/2}$	$f/200$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20	10

B2. Normativa italiana

Si riportano di seguito in ordine cronologico i principali atti governativi in materia di radiazioni elettromagnetiche ad alta frequenza, non considerando quelli relativi ai limiti di campo elettromagnetico generato da elettrodotti alla frequenza di rete di 50 Hz (Decreti del Presidente del Consiglio dei Ministri – DPCM – del 23 aprile 1992 e del 28 settembre 1995).

DM 10 settembre 1998, n. 381

Per ciò che riguarda il quadro legislativo italiano, si fa riferimento al Decreto Ministeriale n.381 del 10 settembre 1998 recante le norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana (pubblicato sulla G.U. n.257 del 3 novembre 1998), attuativo della legge nazionale n.249 del 31 luglio 1997, ed emanato dal Ministero dell'Ambiente d'intesa con il Ministero della Sanità e quello delle Comunicazioni sentiti l'Istituto Superiore di Sanità e l'ex Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA), ora ISPRA.

Tale decreto fissa i valori limite di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici connessi al funzionamento e all'esercizio dei sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi operanti nell'intervallo di frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz, esclusi i lavoratori esposti per ragioni professionali.

In particolare, nell'art. 3 viene specificato che in caso di esposizione i livelli dei campi elettrico e magnetico e della densità di potenza, mediati su di un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su qualsiasi intervallo di sei minuti, non devono superare i valori riportati nella Tabella B2.1.

Tabella B2.1 - Limiti di esposizione ai campi elettromagnetici per la popolazione.

Frequenza f (MHz)	Valore efficace di intensità di campo elettrico E E (V/m)	Valore efficace di intensità di campo magnetico H H (A/m)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente (W/m ²)
0,1 - 3	60	0.2	
> 3 - 3000	20	0.05	1
> 3000 - 300000	40	0.1	4

Nell'art. 4 invece vengono definite le misure di cautela e gli obiettivi di qualità, per il rispetto dei quali è necessario che i nuovi impianti fissi di telecomunicazioni e radiotelevisivi insieme a quelli preesistenti, operanti nell'intervallo di frequenza considerato dalla norma, vengano progettati ed adeguati in modo da produrre valori di campo elettromagnetico più bassi possibili, compatibilmente con l'esigenza di garantire comunque un'adeguata qualità del servizio erogato.

In questo modo vengono regolamentati gli impianti fissi per la telefonia mobile (Stazioni Radio Base), quelli per la generazione e trasmissione dei segnali radio e televisivi, inclusi i ponti radio, gli impianti di comunicazione satellitare, gli impianti fissi utilizzati dai radioamatori ecc, con esclusione dunque dei sistemi mobili quali telefoni cellulari, scanner, apparecchi CB portatili e tutte le altre apparecchiature fisse e mobili che utilizzano radiazioni elettromagnetiche nell'intervallo di frequenza considerato, ma non operano nel settore delle telecomunicazioni o trasmissioni televisive, quali ad esempio i radar.

Il comma II dello stesso articolo prevede inoltre che, in corrispondenza di edifici abitati con permanenze non inferiori a 4 ore, non devono essere superati i seguenti valori, indipendentemente dalla frequenza, mediati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su un qualsiasi intervallo di sei minuti:

- 6 V/m per il valore efficace del campo elettrico
- 0.016 A/m per il valore efficace del campo magnetico
- 0.10 W/m elevato a 2 per la densità di potenza dell'onda piana equivalente, per frequenza compresa tra 3 MHz e 300 GHz

Legge 22 febbraio 2001, n. 36

La legge quadro n. 36 del 22 febbraio 2001 circa la protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, ha come finalità quella di dettare i principi fondamentali al fine di tutelare la salute dei lavoratori, promuovere la ricerca scientifica ed assicurare la tutela dell'ambiente e viene applicata a tutti gli impianti, i sistemi e le apparecchiature per usi civili, militari e delle forze di polizia che possano comportare l'esposizione dei lavoratori a campi elettromagnetici di frequenza compresa tra 0 Hz e 300 GHz; in particolare, tale legge si applica agli elettrodotti ed agli impianti radioelettrici compresi quelli per la telefonia mobile, i radar e gli impianti di radiodiffusione, ad esclusione di esposizione intenzionale per scopi diagnostici o terapeutici.

DPCM 8 luglio 2003

Con riferimento alla legge n. 36/01, questo decreto fissa i limiti di esposizione, i valori attenzione e gli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione all'esposizione di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici sia per frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz, sia per quella industriale di 50 Hz.

Tabella B2.2 - Valori di attenzione (valori efficaci).

Frequenza	Campo elettrico	Campo magnetico	Densità di potenza
0.1 MHz - 300 GHz	6 V/m	0.016 A/m	0.1 W/m ² 3 MHz - 300 GHz

Tabella B2.3 - Limiti di esposizione.

Frequenza MHz	Campo elettrico (V/m)	Campo magnetico (A/m)	Densità di potenza (W/m ²)
0.1 - 3	60	0.20	-
>3 - 3000	20	0.05	1
>3000 - 300000	40	0.01	4

Tabella B2.4 - Obiettivo di qualità.

Frequenza	Campo elettrico (V/m)	Campo magnetico (A/m)	Densità di potenza (W/m ²)
0.1 MHz - 300 GHz	6	0.016	0.10 3 MHz - 300GHz

RAPPORTO ATTIVITÀ B

INTRODUZIONE

In questa attività sono stati acquisiti i dati caratteristici di alcuni vetri multifunzionali utilizzati anche per la schermatura del campo elettromagnetico a radio frequenza, prodotti in commercio dalle principali aziende del settore. Tali dati sono stati analizzati in relazione ai requisiti di progetto in precedenza definiti. Sono stati eseguiti test per la misura dell'efficienza di schermatura a radio frequenza, nell'intervallo da 100 kHz fino ad alcuni gigahertz. Saranno analizzate anche le prestazioni elettromagnetiche di vetri a bassa emissione disponibili in commercio per applicazioni come schermi a bassa attenuazione.

Infine sono stati sviluppati modelli di simulazione numerica di campioni di vetri commerciali per la definizione delle modifiche da apportare in relazione ai requisiti di progetto.

1. Caratteristiche di vetri schermanti commerciali

È stata svolta un'indagine per acquisire le informazioni riguardanti le caratteristiche e l'efficienza di schermatura di vetri disponibili in commercio.

Nel seguito sono riportate i dati di alcuni vetri prodotti da aziende operanti in campo nazionale ed internazionale.

1.1 EmiClare (USA)

Tabella 1.1.1 - Specifiche tecniche di vetri schermanti dell'azienda EmiClare.

TIPO DI SCHERMO	Resistenza	Spessore	Eps relativa
ITO	5 - 50000 [Ohm/sq]	100 - 500 [nm]	170
GRIGLIA	Resistenza	Spessore	"Aperture per inc"
rame acciaio	56.6E6 [Ohm]	0,0022 [mm]	50 - 100

TIPO DI SUBSTRATO	Spessore [mm]	Eps relativa
Vetro	0.8 - 4	3.8 - 14.5
Vetro anti riflesso	1.1 - 1.6	3.8 - 14.5
Vetro chimicamente temperato	0.5 - 5	3.8 - 14.5
Policarbonato	0.5 - 4	2.8 - 3.2
Arcilico	0.5 - 4	2.8E-4

La figura 1.1.1 mostra un campione di ITO avente la dimensione di un foglio A4, resistenza superficiale di 15 Ohm/Square deposto su substrato di polycarbonato di spessore 0.5 mm. Nella stessa figura sono riportati i valori di efficienza di schermatura per diversi valori della diagonale dell'apertura e della frequenza.

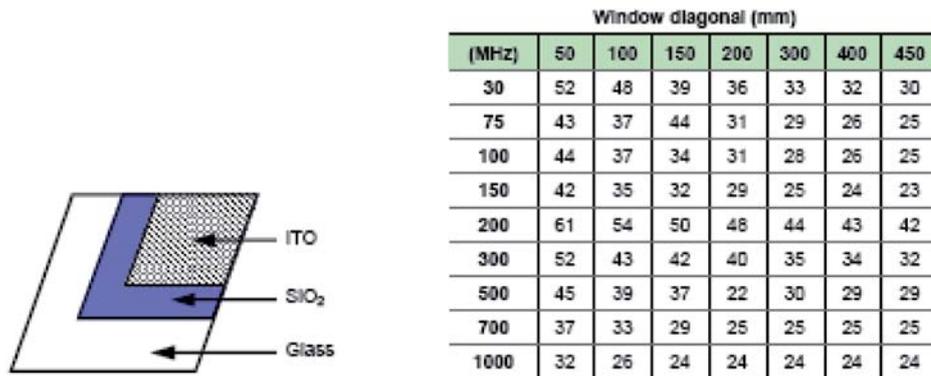


Figura 1.1.1 - Riferimenti dal data-sheet della casa costruttrice: composizione del campione e SE dichiarata.

La figura 1.1.2 mostra la foto dello schermo a griglia di un campione di griglia metallica di rame 100 "opi" (openings per inch) inserita tra due substrati di polycarbonato di spessore totale pari a 3 mm.

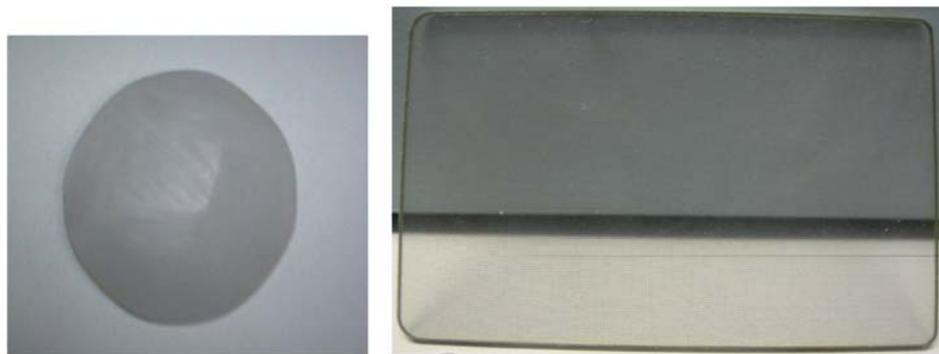


Figura 1.1.2 - Foto dello schermo a griglia.

Nelle figure 1.1.3 e 1.1.4 sono rappresentate rispettivamente la trasmittanza ottica e l'attenuazione del campione a griglia nel campo di frequenza 200 kHz-10 MHz.

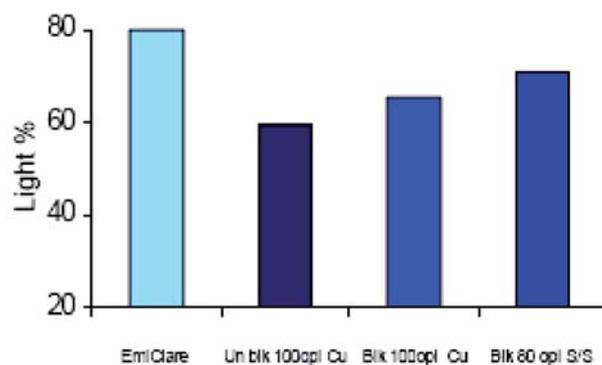


Figura 1.1.3 - *Trasmittanza nel visibile.*

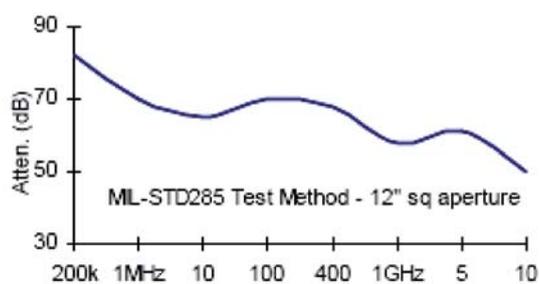


Figura 1.1.4 - *Efficienza di schermatura tratta dal data-sheet del campione.*

1.2 Evaporated Inc. (USA)

Tabella 1.2.1 - *Specifiche tecniche di vetro schermante dell'azienda Evaporated Inc.*

TIPO DI SCHERMO	Resistenza	Spessore	Eps relativa
ITO	<4,5 - 50000 [Ohm/sq]	15 -316 [nm]	170

TIPO DI SUBSTRATO
Vetro
Polimeri
Polistirene
Policarbonato
Acrilico

1.3 PGO (Germany)

Tabella 1.3.1 - Specifiche tecniche di vetri schermanti dell'azienda PGO.

TIPO DI SUBSTRATO	Spessore [mm]	Eps relativa
	Vetro	0.80 - 10
Tipi di vetro proprietari		
AF37	0.7	5.05
AF345	0.05 - 1	6.02
D263T	0.03 - 11	6.07
Polimeri		
Acrilico	0.5 - 6	3.00
Policarbonato	0.5 - 4	2.08

Tra i produttori internazionali considerati l'azienda americana "EmiClare Optical Filters" (rivenditore italiano "Technopartner S.p.A") produce vetri schermanti con le migliori prestazioni in base alle specifiche riportate sui data-sheet.

2 Metodi di misura dell'efficienza di schermatura di film sottili

2.1 Misura della *sheet-resistance* di film sottili

La *sheet-resistance* R_s di un film sottile è definita dal rapporto tra il gradiente di potenziale sulla superficie ed il prodotto della densità di corrente J per lo spessore d del materiale avente conducibilità σ :

$$R_s = \frac{E}{Jd} = \frac{1}{\sigma d} \quad (2.1)$$

La resistenza R_s è misurata con il metodo a quattro punte che utilizza un sistema con quattro sonde collegate con un Source Meter. Le figure 2.1.1 e 2.1.2 mostrano le foto dei due strumenti.

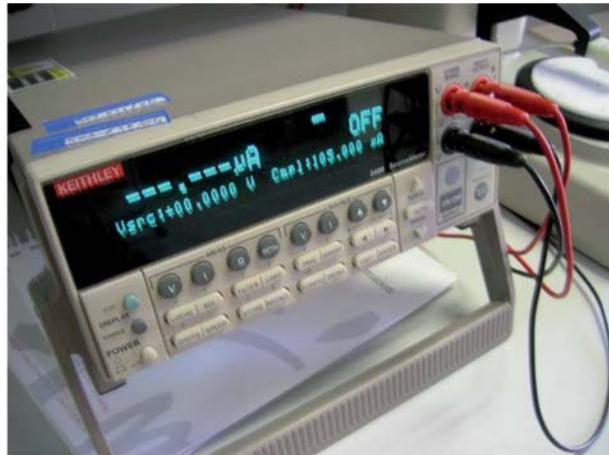


Figura 2.1.1 - Foto del Keithley 2400 Source Meter.

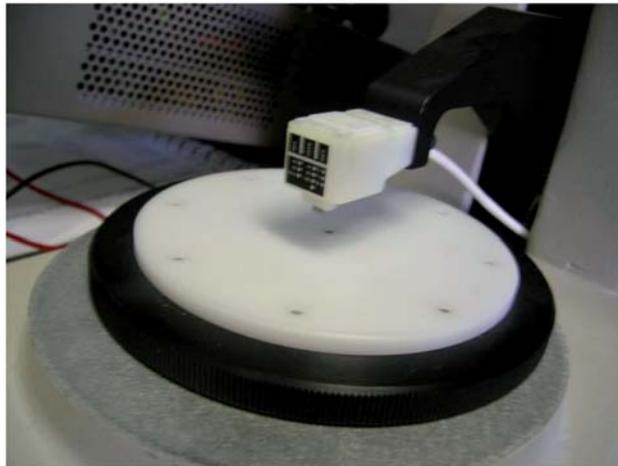


Figura 2.1.2 - Signatone S301 four-point probe stand.

Lo schema del metodo di misura a quattro punte è rappresentato in fig.2.1.3.

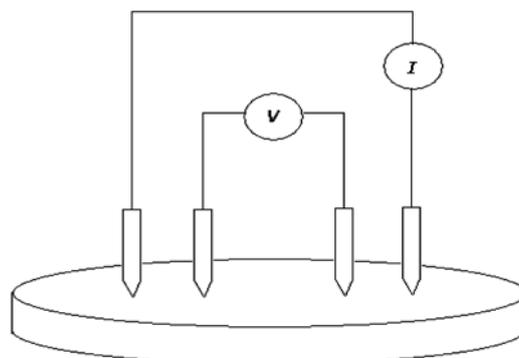


Figura 2.1.3 - Schema del dispositivo di misura a 4 punte.

Le quattro sonde di tensione (le due più interne) e di corrente (quelle più esterne) poggiano su un wafer di spessore d . La resistenza si ottiene come rapporto della tensione V e della corrente I : la misura deve essere ripetuta più volte posizionando il test probe in cinque differenti punti del campione secondo lo standard *ASTM F390-98* [2] che descrive in dettaglio le modalità della prova. Il valore medio misurato deve essere poi corretto mediante un fattore che tiene conto delle caratteristiche del campione e della geometria del test probe. Solitamente il fattore correttivo viene posto uguale a 4.53.

Misurata la *sheet-resistance* si ottiene dalla (2.1) il valore della conducibilità del film sottile che viene a sua volta utilizzata nella procedura di calcolo dell'efficienza di schermatura descritta nel seguito.

2.2 Misura di *SE* in guida d'onda coassiale

La procedura ha lo scopo di calcolare l'efficienza di schermatura (*SE*) per mezzo della misura dei parametri di scattering. Poiché gli standard di misura attualmente esistenti risultano applicabili solo per una frequenza massima di 1.5 GHz secondo la *ASTM D4935-89* [3], è stata presentata una procedura che consente di ampliare il campo di frequenza fino a 8 GHz [7].

2.2.1 Standard di misura

Esistono diversi tipi di misurazione della *SE*, alcuni basati sull'uso di celle coassiali monomodali TEM (in accordo con gli standard *ASTM E57 -D4935*), altri sull'utilizzo di antenne riceventi e trasmettenti (standard modificato *MIL-STD-285*), entrambi con limiti in frequenza di 1 GHz.

Il metodo *ASTM D4935* usa due flange (*FCSH* – Flanged Coaxial Sample Holder) tra le quali viene inserito il campione in prova, entrambe connesse ad un cavo coassiale. Gli aspetti critici sono costituiti dall'eccitazione dei modi di ordine superiore quando vengono misurati campioni spessi, e dalla ristretta banda di frequenza di funzionamento, compresa tra 30 MHz – 1.5 GHz, inadeguata rispetto alla frequenza di utilizzo degli apparati elettronici attualmente in uso. In più, le dimensioni richieste per il campione rendono il test inutilizzabile per i nuovi materiali nanostrutturati.

2.2.2 Standard di misura modificato

Lo standard *ASTM D4395* “modificato” consente misure di *SE* in un più ampio range di frequenza compreso tra 0.4 e 8 GHz, grazie all'adozione di un nuovo tipo di flangia, di dimensioni minori rispetto a quelle previste dallo standard. Si deve comunque rilevare che a causa della presenza di fenomeni di risonanza a frequenze inferiori di quella di taglio della cella coassiale la frequenza massima dipende dai parametri elettrici e dallo spessore del materiale in prova ed è comunque limitata ad alcuni GHz. Con questa procedura è possibile ottenere un'accurata previsione della *SE* misurando l'insertion loss (*IL*). Si deve rilevare che il test bene si adatta alla misura di *SE* di film conduttori sottili su substrato, ma non altrettanto di schermi con tre strati quali le griglie metalliche.

Come raccomandato dallo standard *ASTM D4935*, la misura della *IL* viene fatta usando flange *FCSH* a 2 porte, connesse ad un generatore/ricevitore di segnale.

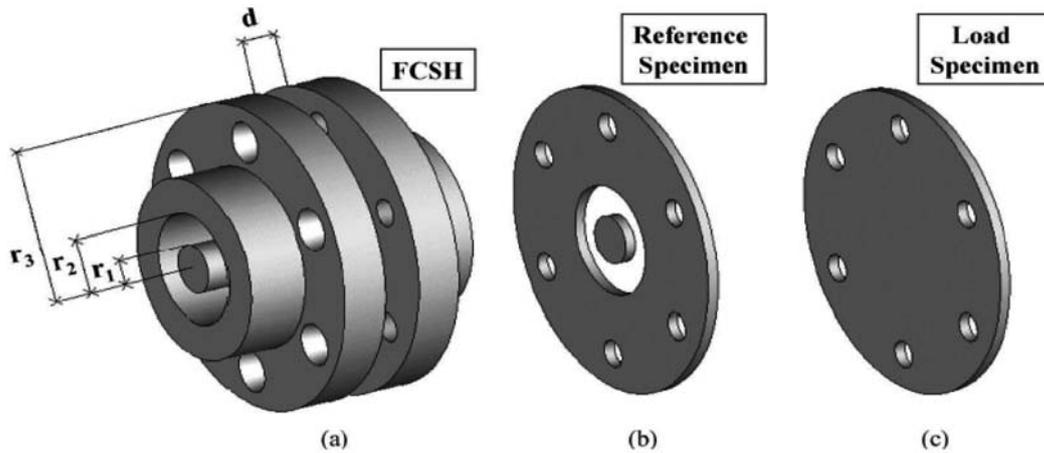


Figura 2.2.2.1 - (a) flangia FCSH, (b) reference specimen, (c) load specimen.

La IL può essere calcolata come rapporto, in dB, tra la potenza ricevuta con il campione di riferimento e quella ricevuta con il campione in prova, posti uno alla volta tra le due flange:

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{RIFER.}}{P_{CARICO}} \right) \quad (2.2)$$

La misura può essere facilmente fatta per mezzo di un analizzatore vettoriale di rete, il quale permette di esprimere la IL in funzione dei parametri di scattering della rete :

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{S_{21_RIFER.}}{S_{21_CARICO}} \right) \quad (2.3)$$

Avvalendosi del circuito equivalente della configurazione si può dimostrare la seguente espressione dell'insertion loss [7]:

$$IL_{dB} = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\eta_0 \sigma d}{2} \right) \quad (2.4)$$

Se la frazione nella formula è $\gg 1$, la IL assume la seguente forma:

$$IL \cong 20 \log_{10} \left(\frac{\eta_0 d \sigma}{2} \right) = 45.51 + 20 \log_{10} (\sigma d) \quad (2.5)$$

Per utilizzare una frequenza superiore a quella massima prevista per lo standard ASTM, pari a 1.5 GHz, è necessario modificare i raggi r_1 , r_2 , r_3 delle flange secondo la procedura descritta in [7]. Nella tabella 2.2.21 vengono paragonati i diametri di FCSH standard con quelli indicati nel standard modificato.

Tabella 2.2.2.1 - Valori dei raggi delle flangie indicati nello standard e nello standard modificato.

FCSH	r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_3 [mm]	f_c [GHz]
Standard: FCSH1	16.5	38.1	64	1.75
New: FCSH2	3.5	8	39	8.3
New: FCSH3	3.5	8	22	8.3

Si deve rilevare che ilaggio r_3 influenza particolarmente la misura di IL . Da una parte infatti, r_3 dovrebbe essere più grande possibile per incrementare l'accoppiamento capacitivo tra le due sezioni delle $FCSH$, d'altra parte è però necessario mantenere la sua dimensione contenuta sia per limitare la dimensione del campione in prova a pochi centimetri quadrati, sia per impedire percorsi risonanti nello spettro di frequenza della IL misurata. Test sperimentali hanno infatti dimostrato che potrebbero verificarsi risonanze nello spettro di frequenza dei parametri di scattering e quindi nello spettro di IL la cui ampiezza e frequenza dipendono essenzialmente da r_3 e dallo spessore dei campioni; inoltre anche i buchi presenti sulle flangie, nei quali vanno inserite le viti non conduttrici per il collegamento tra le stesse (come raccomanda lo standard), possono influenzare la misura.

In definitiva, nel dimensionamento delle $FCSH$, il raggio esterno delle flangie r_3 e lo spessore d del campione devono essere i più bassi possibili. Per questo motivo nel set up di misura l'intera superficie delle flangie è ricoperta da un sottile strato di rame applicato con colla conduttrice, al fine di eliminare l'influenza dei buchi. Poiché l'ampiezza e la posizione dei picchi di risonanza che caratterizzano lo spettro in frequenza variano all'interno del range considerato, la misura del riferimento RIF non consente di ottenere un valore della SE accurato in tutto il range di frequenza.

Per poter eseguire le misure adottando la procedura di misura modificata descritta sono necessari l'analizzatore Vettoriale di rete (Vector Network Analyzer) modello "Anritsu 37369c", connettori di tipo N e le flangie, le cui foto sono rispettivamente nelle figure 2.2.2.2, 2.2.2.3 e 2.2.2.4.



Figura 2.2.2.2 - Analizzatore di rete.



Figura 2.2.2.3 - *Connettore di tipo N.*



Figura 2.2.2.4 - *Flangia per la procedura di misura standard modificata.*

2.3 Misure di *SE* in camere riverberanti annidate

Il metodo delle camere riverberanti annidate sta trovando sempre maggiore impiego per le misure di *SE* dei materiali e delle enclosures, tanto da essere previsto nel nuovo standard IEEE 299 in corso di stesura. La figura 2.3.1 schematizza la tecnica utilizzata per la misura mediante camere riverberanti annidate secondo lo standard internazionale IEC 61000-4-21.

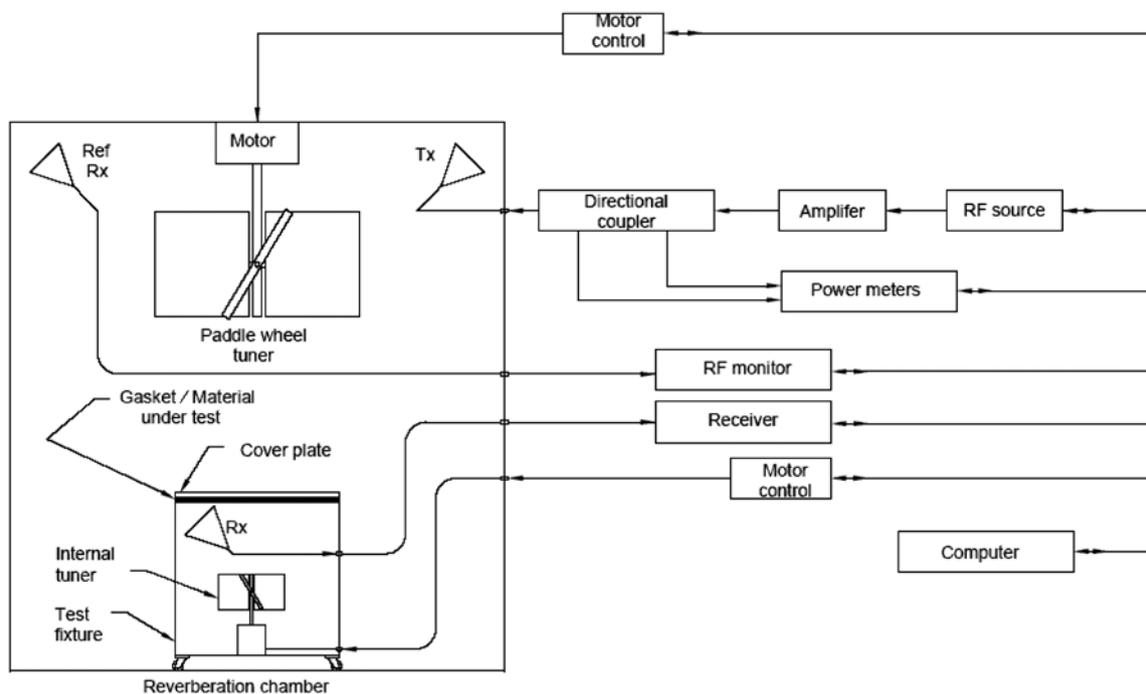


Figura 2.3.1 - Schema della tecnica per la misura mediante camere riverberanti annidate secondo lo standard IEC 61000-4-21.

La differenza principale di questo metodo rispetto alla guida d'onda consiste nelle caratteristiche dell'eccitazione e quindi dei campi elettromagnetici che incidono sul materiale: essi non sono più solamente costituiti da onde piane con angolo di incidenza normale. L'eccitazione può essere schematizzata come una serie di onde piane che presentano successivamente tutte le possibili direzioni e polarizzazioni distribuite casualmente nel tempo. Per questi motivi, l'analisi che si applica alle misure è di tipo statistico e i risultati vengono ottenuti come media delle singole misure. Il processo di misura può richiedere tempi relativamente lunghi (nell'ordine dell'ora) che comunque dipendono dai parametri e dalle impostazioni. Per ottimizzare i passaggi ed evitare errori, la misura è stata automatizzata ed affidata ad un software di controllo ed elaborazione.

Un vantaggio della tecnica consiste nella possibilità di testare strutture di dimensioni maggiori di quelle possibili in guida (fino a quelle della camera interna) e senza ipotizzare una superficie indefinita. Nell'applicazione specifica che si sta analizzando, la tecnica presenterebbe il vantaggio di testare una piccola finestra includendo i supporti o gli infissi.

Le figure 2.3.2 e 2.3.3 mostrano le foto dell'interno della camera riverberante di dimensioni 3.52 m x 2.95 m x 2.49 m situata presso il laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica del Dipartimento di Ingegneria Elettrica della Sapienza.



Figura 2.3.2 - Foto dell'interno della camera riverberante con stirrer.



Figura 2.3.3 - Interno della camera con antenna Horn ricevente.

All'interno della camera è stata posta una struttura scatolare aperta da un lato, di dimensioni 0.70 m x 0.70 m x 0.70 m (figura 2.2.4).

È importante sottolineare che le proprietà statistiche utili alla misura devono essere verificate preliminarmente prima di procedere alle misure effettive attraverso la stima teorica e spe-

rimentale di opportuni parametri specifici della camera. Tra questi è opportuno citare la *lowest usable frequency (LUF)* ovvero la minima frequenza che garantisce la presenza di un numero di modi sufficiente a garantire la casualità, l'uniformità e l'isotropia dei campi elettromagnetici. Nel caso della camera utilizzata tale frequenza vale 280 MHz.



Figura 2.3.4 - Struttura scatolare di prova.

Il foglio in prova viene posto su un'apertura della struttura scatolare metallica, come riportato in figura 2.3.5.



Figura 2.3.5 - Pannello metallico con apertura.

All'interno della scatola viene posta un'antenna loop, collegata all'esterno ad un analizzatore vettoriale Agilent, la quale irradia il campo elettromagnetico in direzione normale rispetto al pannello in prova con frequenza compresa tra 1 GHz e 5.9 GHz e passo di 100 MHz. All'interno della camera è presente uno stirrer il quale, azionato da un motore passo-passo, provvede a "mescolare" le componenti di campo rendendolo isotropo.

All'interno della camera, esternamente alla struttura scatolare, è stata posta un'antenna ricevente di tipo "horn", anch'essa connessa all'analizzatore di rete, la quale ha la funzione di misurare il campo al di fuori della scatola metallica.

L'analizzatore, che ha la funzione di misurare i parametri di scattering, è interfacciato con un pc attraverso un codice LabView, dal quale è possibile ricavare tutti i dati.

2.4 Tecniche di misura e di stirring in camere riverberanti annidate

Lo standard IEC 61000-4-21 [4] sui metodi di misura in camera riverberante (*RC*) descrive l'uso di *RC* con agitazione meccanica dei modi per la misura della *SE*. Lavori recenti hanno presentato una tecnica, basata su *RC* annidate, per la caratterizzazione della *SE* di materiali planari montati su strutture scatolari conduttive. Questo approccio può essere applicato se la suddetta struttura scatolare si comporta come una *RC*, ovvero se nell'intervallo di frequenze di interesse in essa può essere eccitato un regime di propagazione multimodale. La possibilità di utilizzare una tecnica di *frequency mode-stirring (FS)* per produrre un ambiente riverberante è stato recentemente proposto per la misura della *SE* di strutture scatolari di piccole dimensioni. L'*FS* è un approccio alternativo di agitazione dei modi piuttosto facile e veloce da implementare. Esso consiste nell'eccitare un certo numero di frequenze contemporaneamente per stimolare una propagazione multimodale all'interno della struttura senza l'uso di agitatori meccanici.

La misura della *SE* di una finestra trasparente rivestita di un film sottile di ITO può essere eseguita applicando la procedura che viene descritta nel seguito [11]. Il set-up per la misura della *SE* del pannello schermante consiste in una scatola di alluminio di 3 mm di spessore di dimensioni 70 cm × 70 cm × 70 cm, con una apertura di 24 cm × 15.5 cm centrata su una delle pareti (figura 2.4.1(a)). Il pannello da testare viene montato sull'apertura (figura 2.4.1(b)). La scatola viene quindi posizionata all'interno di una *RC* di dimensioni 3.5 m × 3 m × 2.5 m equipaggiata con agitatori meccanici. L'antenna trasmittente (T_x) è situata all'interno della *RC* (e all'esterno della scatola), mentre l'antenna ricevente (R_x) trova posto nella scatola di alluminio, nella quale non sono presenti agitatori meccanici. La T_x è alimentata con un segnale di *FS* generato con un analizzatore di reti vettoriale, la cui porta ricevente è connessa con la R_x . Un amplificatore da 25 W viene inserito nella catena di misura per incrementare il range dinamico della configurazione.

La *SE*, definita in termini di potenza attiva dall'espressione è:

$$SE_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{source}}{P_{shield}} \right) \quad (2.6)$$

in cui P_{source} e P_{shield} sono la potenza ricevuta senza schermo (figura 2.4.1(a)) e con lo schermo (figura 2.4.1(b)), rispettivamente. Poiché è stato dimostrato che le caratteristiche di un'antenna operante in una *RC* sono diverse da quelle nello spazio libero e dipendono dalla particolare configurazione, occorre sempre misurare e compensare gli effetti di disadattamento dell'antenna

nella situazione in cui sta operando. I parametri di scattering S_{11} , S_{22} , S_{21} vengono misurati nelle due configurazioni: i pedici 1 e 2 corrispondono alle porte connesse alle antenne T_x e R_x , rispettivamente. Le misure sono state effettuate con la tecnica di stirring ibrido sviluppata nel laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica del Dipartimento di Ingegneria Elettrica della Sapienza. Lo stirring è ibrido in quanto unisce le caratteristiche dello stirring meccanico (agitatore nella camera esterna) con quelle del frequency stirring. L'antenna T_x è un'antenna horn posta nella camera esterna, quella R_x è ancora una horn nella camera interna. Le distanze tra le parti metalliche (pareti, stirrer, antenne, camera interna) sono state scelte in modo da non produrre accoppiamenti indesiderati. Le antenne sono collegate ad un analizzatore vettoriale di rete (VNA) a due porte controllato da un pc tramite interfaccia IEEE-488 GPIB. Poiché il range dinamico delle misure è piuttosto esteso, tra il VNA e l'antenna T_x è stato inserito un amplificatore. Tale amplificatore determina, di fatto, la larghezza di banda disponibile per le misure. Infatti, oltre una certa frequenza minima di funzionamento (la LUF della camera utilizzata è 280 MHz) dipendente dalle dimensioni fisiche, la banda della camera è praticamente illimitata. Tutto il sistema è gestito da uno strumento virtuale LabView che imposta i parametri di generazione ed acquisizione del VNA ed allo stesso tempo controlla i movimenti dello stirrer meccanico tramite l'azionamento di un motore passo-passo. Per compensare alcuni effetti indesiderati le misure sono sempre effettuate per confronto con una configurazione di riferimento a camera aperta.

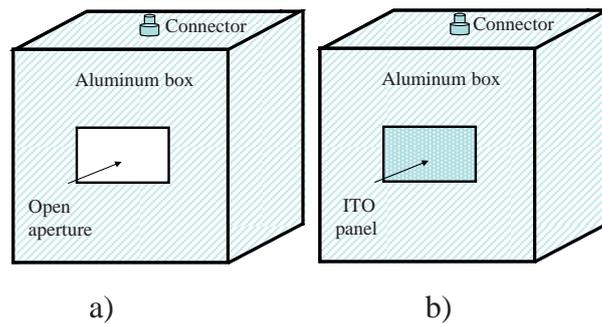


Figura 2.4.1 - Set-up per la misura della SE del pannello ricoperto di ITO: a) scatola con apertura; b) scatola con apertura chiusa con pannello da testare.

La SE in dB opportunamente corretta ed espressa in termini di parametri di scattering assume la seguente forma [11]:

$$SE_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{1 - \langle |S_{22}|_B^2 \rangle}{1 - \langle |S_{22}|_A^2 \rangle} \cdot \frac{\langle |S_{21}|_A^2 \rangle}{\langle |S_{21}|_B^2 \rangle} \cdot \frac{1 - \langle |S_{11}|_B^2 \rangle}{1 - \langle |S_{11}|_A^2 \rangle} \right) \quad (2.7)$$

Nella formula i pedici A e B si riferiscono alle configurazioni sperimentali di figura 2.4.1(a) e (b), rispettivamente, e i simboli $\langle \cdot \rangle$ denotano l'operazione di media su una popolazione di misura, in quanto, come detto, la camera fornisce informazioni statistiche sulle varie grandezze. Le medie sono state effettuate sia in frequenza su una opportuna agility bandwidth $\Delta\varphi$ (frequency stirring), sia su un numero di posizioni di una rotazione completa dell'agitatore meccanico (mechanical stirring).

In realtà esistono due possibili tipi di stirring meccanico: quello a rotazione continua e quello a passi discreti, ognuno con specifici vantaggi e svantaggi. Nella procedura è stata implementata la rotazione discreta sia perché è quella attualmente più diffusa, sia perché offre maggiori possibilità in termini di elaborazione dei dati. Purtroppo, in questo caso, dopo ogni rotazione dello stirring è necessario attendere un tempo τ tale da permettere alla pala di smorzare le oscillazioni dovute alla rotazione ed al campo di raggiungere la condizione di campo stazionario (steady state). Come scelta molto cautelativa è stato scelto $\tau = 10$ s.

3 Metodi di calcolo dell'efficienza di schermatura di film sottili

3.1 Film sottile piano indefinito

L'analisi dell'interazione di un'onda piana con uno schermo piano indefinito è svolta applicando la teoria della linea di trasmissione descritta nel precedente rapporto sull'Attività A.

Si consideri un film sottile a singolo strato di spessore d , illuminato da un'onda piana TEM con incidenza normale. La propagazione del campo elettromagnetico nell'aria che circonda lo schermo è analizzata considerando le seguenti equazioni di propagazione:

$$\frac{dE_y}{dx} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.1a)$$

$$\frac{dH_z}{dx} = -j\omega\varepsilon_0 E_y \quad (3.1b)$$

All'interno dello schermo si ha:

$$\frac{dE_y}{dx} = -j\omega\mu H_z \quad (3.2a)$$

$$\frac{dH_z}{dx} = -(j\omega\varepsilon + \sigma) E_y \quad (3.2b)$$

Le equazioni sono risolte applicando le seguenti condizioni al contorno alle facce dello schermo. In $x = 0$ risulta:

$$\begin{aligned} E_{y0} &= E_{y0}^i + E_{y0}^r \\ H_{z0} &= H_{z0}^i - H_{z0}^r \end{aligned} \quad (3.3a)$$

in cui:

$$\begin{aligned} E_{y0}^i &= \eta_0 H_{z0}^i \\ E_{y0}^r &= \eta_0 H_{z0}^r \end{aligned} \quad (3.3b)$$

Le componenti di campo con apice "i" ed "r" si riferiscono rispettivamente al campo incidente e a quello riflesso. Combinando le precedenti espressioni si ottiene:

$$E_{y0} = 2E_{y0}^i - \eta_0 H_{y0} \quad (3.4)$$

La condizione al contorno in $x = d$ si riferisce alle componenti di campo in aria:

$$E_{yd} = \eta_0 H_{zd} \quad (3.5)$$

La relazione matriciale tra le componenti di campo in ingresso e in uscita è descritta dalla seguente ben nota equazione:

$$\begin{bmatrix} E_{yd} \\ H_{zd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{y0} \\ H_{z0} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

in cui i coefficienti della matrice di trasmissione valgono:

$$\Phi_{11} = \Phi_{22} = \cosh(\gamma d) \quad (3.7a)$$

$$\Phi_{12} = -\eta \sinh(\gamma d) \quad (3.7b)$$

$$\Phi_{21} = -\frac{1}{\eta} \sinh(\gamma d) \quad (3.7c)$$

nelle quali la costante di propagazione e l'impedenza intrinseca dello schermo hanno rispettivamente le seguenti espressioni:

$$\gamma = j\omega \sqrt{\mu(\varepsilon + \sigma/j\omega)} \quad (3.8a)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon + \sigma/j\omega}} \quad (3.8b)$$

L'efficienza di schermatura è definita dalla seguente espressione:

$$SE = 20 \log \left| \frac{\hat{E}_{yd}}{E_{yd}} \right| \quad (3.9)$$

in cui \hat{E}_{yd} è il campo nel punto $x = d$ in assenza dello schermo e $\overline{E_{yd}}$ il campo in presenza dello schermo.

Si assume quindi la seguente identità:

$$|\hat{E}_{yd}| = |\hat{E}_{y0}|$$

e quindi:

$$|\hat{E}_{y0}| = |E_{y0}^i|$$

Tenuto conto delle espressioni sopra definite si ottiene la seguente espressione dell'efficienza di schermatura:

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{\Phi_{11} + \Phi_{22} - \eta_0 \Phi_{21} - \eta_0^{-1} \Phi_{12}}{2} \right) \quad (3.10)$$

Nel caso di schermo buon conduttore ($\sigma \gg \omega \epsilon_0 \epsilon_r$) ed elettricamente sottile ($d \ll \delta$) la (3.10) assume la seguente forma approssimata:

Si deve rilevare che l'efficienza di schermatura è praticamente coincidente con il coefficiente di riflessione in quanto lo spessore micrometrico o nanometrico rende estremamente ridotto il contributo di attenuazione dovuto al coefficiente di assorbimento.

$$SE_0 = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\eta_0 d \sigma}{2} \right) \quad (3.11)$$

Se $\eta_0 d \sigma / 2 \gg 1$, risulta:

$$SE_0' \cong 20 \log_{10} \left(\frac{\eta_0 d \sigma}{2} \right) = 45.51 + 20 \log_{10} (\sigma d) \quad (3.12)$$

che è coincidente con la (2.5).

Si può notare che la (3.12) rappresenta il valore asintotico dell'efficienza di schermatura per frequenza che tende a zero.

Poiché la sheet-resistance in precedenza definita vale:

$$R_{sheet} = \frac{1}{\sigma d}, \quad (3.13)$$

la (3.12) può esprimersi anche nella seguente forma:

$$SE_0' \cong 45.51 - 20 \log_{10} (R_{sheet}). \quad (3.14)$$

Si deve rilevare che l'efficienza di schermatura è praticamente coincidente con il coefficiente di riflessione in quanto lo spessore micrometrico o nanometrico rende estremamente ridotto il contributo di attenuazione dovuto al coefficiente di assorbimento.

La procedura basata sull'analogia con le linee di trasmissione è ancora utilizzabile nel caso di schermo sottile multistrato. In questo caso la matrice di trasmissione è definita dal prodotto delle matrici relative ai differenti strati; se la struttura è composta da strati dielettrici e da strati dello stesso materiale conduttivo la SE può essere calcolata ancora con la (3.12) nella quale d rappresenta lo spessore totale degli strati conduttivi di conducibilità σ .

3.2 Film sottile sull'apertura di struttura scatolare

Si consideri una struttura scatolare avente le pareti in materiale perfettamente conduttore (PEC) ed un'apertura sulla quale è posizionato un pannello sottile trasparente. La struttura viene ec-

citata da un'onda piana in direzione normale al pannello, avente un campo elettrico descritto dall'impulso di Dirac.

L'analisi è eseguita utilizzando un codice di simulazione basato sul metodo tridimensionale alle differenze finite *3D-FDTD*. È implementato lo schema di Yee usando celle cubiche la cui dimensione, passo di discretizzazione spaziale Δs , è legata al passo di discretizzazione temporale Δt dalla condizione di Courant che assicura stabilità numerica. Si utilizzano condizioni al contorno di tipo *Uniaxial Perfect Matched Layers (UPML)* lungo i bordi del dominio computazionale in modo da ottenere assenza di riflessione. Allo scopo di superare i problemi dovuti all'uso di un passo Δs molto piccolo nello schema *FDTD* relativo alla discretizzazione del film sottile, si definiscono le seguenti condizioni al contorno sulle componenti di campo elettrico e di campo magnetico tangenti alle superfici esterne dello schermo nel dominio del tempo:

$$E_{y0}(t) = z_0(t)*H_{z0}(t) - z_t(t)*H_{zd}(t) \quad (3.15a)$$

$$E_{yd}(t) = z_t(t)*H_{z0}(t) - z_d(t)*H_{zd}(t) \quad (3.15b)$$

in cui i coefficienti di impedenza sono calcolati mediante trasformata inversa di Fourier della matrice di impedenza nel dominio della frequenza, ottenibile dalla formulazione basata sull'analogia della linea di trasmissione, rappresentata in forma razionale mediante poli e residui (Vector Fitting Procedure):

$$[z(t)] = F^{-1} \{ [Z(\omega)] \} \quad (3.16)$$

La forma discreta delle condizioni di impedenza al contorno è ottenuta applicando uno schema ricorsivo all'integrazione numerica dei prodotti di convoluzione che compaiono nelle (3.15a,b).

4 Misura e calcolo dell'efficienza di schermatura di campioni commerciali

4.1 Foglio di polycarbonato commerciale dello spessore di 175 μm rivestito su una delle due superfici da ITO di spessore 0.5 μm

Il pannello schermante trasparente caratterizzato è costituito da un foglio di polycarbonato commerciale dello spessore di 175 μm , rivestito su una delle due superfici di ITO. L'analisi è stata effettuata nell'intervallo di frequenze da 1 GHz a 4.5 GHz [11].

Nel seguito vengono confrontati e discussi i risultati ottenuti con tre differenti tecniche sperimentali.

4.1.1 Misura di sheet-resistance

La sheet resistance R_s del film sottile conduttivo viene misurata applicando il metodo di misura di resistenza a quattro punte che è stato descritto in precedenza. I risultati sono riportati in tabella 4.1.1.1. Ripetendo la misura in vari punti, la sheet resistance media calcolata (R_s) è 13.35 ohms/square con una deviazione standard del 2.5%. Ne risulta che il film di ITO è caratteriz-

zato da una conducibilità in corrente continua (dc) σ_{dc} di circa 150 kS/m se si considera che lo spessore medio del rivestimento sull'intera superficie del campione è $d=0.5 \mu\text{m}$.

I valori di d e σ_{dc} vengono usati per predire la SE del film conduttivo. Dal momento che la copertura schermante è elettricamente sottile fino a circa 10 GHz, risulta che, nell'intervallo di frequenze considerate, la SE è approssimativamente costante e può essere calcolata mediante l'espressione (3.12). Risulta $SE_{dB} = 23 \text{ dB}$.

Tabella 4.1.1.1 - Sheet Resistance Misurate in Cinque Punti Differenti del Campione Rivestito di ITO.

Misura	Tensione/Corrente [V/A]	R_s [ohms/square]
1	2.92	13.23
2	2.92	13.23
3	2.98	13.5
4	3.05	13.8
5	2.86	12.96

4.1.2 Misura di SE con cella TEM coassiale

Al fine di validare i risultati appena ottenuti, la SE del film di ITO è stata misurata nell'intervallo di frequenze da 40 MHz a 8 GHz con il metodo della linea di trasmissione coassiale basato sullo standard ASTM D4935 e quello basato sullo standard modificato descritti in precedenza.

La figura 4.1.2.1 mostra lo spettro di frequenza della SE misurata da 1 GHz a 4.5 GHz. Si può notare che la SE è quasi costante sull'intero intervallo di frequenze e che il suo valore medio è di circa 21 dB. Questo conferma che i fenomeni di assorbimento sono trascurabili e che la SE è dovuta principalmente a fenomeni di riflessione. I risultati ottenuti si accordano in maniera soddisfacente con quelli ottenuti in precedenza.

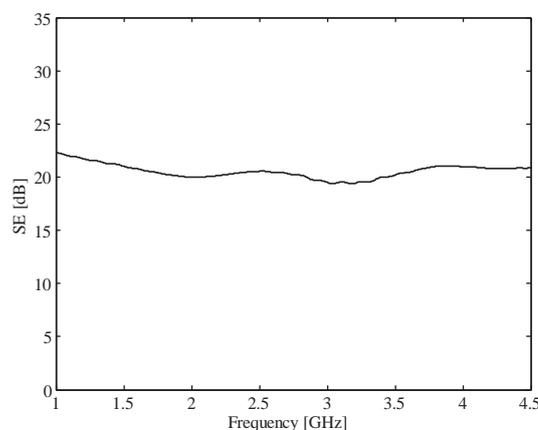


Figura 4.1.2.1 - Spettro in frequenza della SE del foglio di ITO misurata con il metodo della guida coassiale nell'intervallo di frequenze da 1 GHz a 4.5 GHz.

4.1.3 Misura di SE con camere riverberanti annidate

Si considera il set-up per la misura della SE del pannello schermante descritto in precedenza, rappresentato nelle figure 2.2.6 (a) e (b). La misura è stata effettuata con il pannello schermante contattato e non contattato alla scatola, come mostrano le figure 4.1.3.1 (a) e (b). Nella prima configurazione, la superficie di ITO del pannello è stata messa direttamente a contatto con il bordo di alluminio dell'apertura, mentre nella seconda configurazione, è stata creata una fessura di 1 mm tra la faccia conduttiva e il bordo dell'apertura della scatola.

Nel seguito viene presentata una analisi comparativa dell'effetto dell'agitazione meccanica, FS e ibrida sulla misura della SE del pannello considerato.

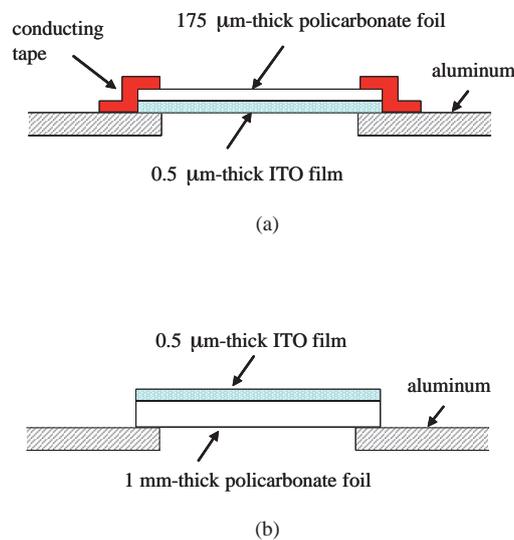


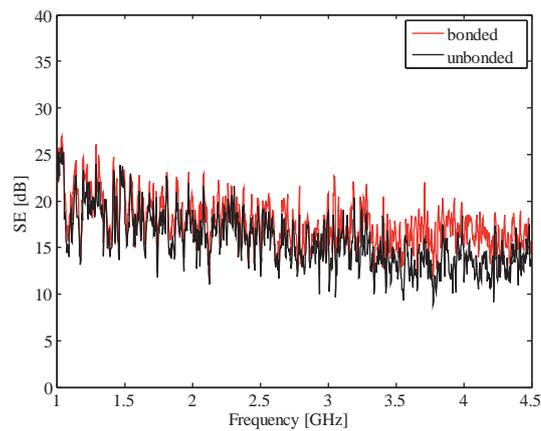
Figura 4.1.3.1 - Schema della configurazione di test: (a) con contatto (bonded), (b) senza contatto (unbonded).

Frequency stirring

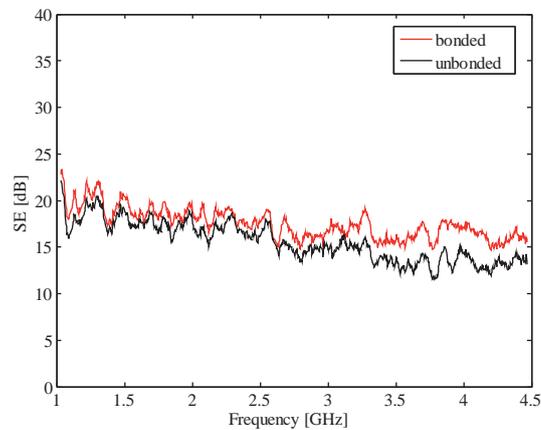
In primo luogo, la SE viene stimata considerando una agility bandwidth $\Delta\phi=200$ MHz e senza effettuare l'agitazione meccanica dei modi nella RC esterna. La media in frequenza è calcolata usando n_f campioni per ogni intervallo largo $\Delta\phi$, nell'intervallo di frequenza da 1 GHz a 4.5 GHz. Le figure 4.1.3.2 (a) e (b) mostrano i risultati ottenuti nelle configurazioni con e senza contatto per $n_f=200$ e $n_f=1000$, rispettivamente. E' da notare che il numero di modi eccitati aumenta con l'aumentare di n_f , con conseguente miglioramento delle prestazioni riverberanti della camera. I risultati si accordano con quelli di figura 4.1.2.1, a meno di 2-4 dB ottenuti usando il metodo in guida coassiale. Entrambe le curve sono leggermente decrescenti perchè il film schermante è sottile ed è caratterizzato da una *sheet resistance* di 13.35 ohms/square, con uno spessore di soli 0.5 mm. Le caratteristiche risonanti delle curve mostrate in figura 4.1.3.2 (b) confermano che l'ambiente elettromagnetico non è adeguatamente reso riverberante. Inoltre, la SE misurata nella RC è in media di 3 dB - 5 dB minore di quella misurata in guida coassiale a causa dell'effetto delle dimensioni finite del pannello e della sua illuminazione multidirezionale.

Agitazione meccanica

La *SE* dello schermo di ITO è stata misurata azionando solamente l'agitatore meccanico nella *RC* esterna e senza applicare il *FS*. Sono state considerate entrambe le configurazioni con (*bonded*) e senza contatto (*unbonded*). I risultati ottenuti sono presentati in figura 4.1.3.3. L'elevato numero di risonanze presenti nello spettro in frequenza della *SE* è dovuto a una propagazione non adeguatamente multimodale all'interno della scatola di alluminio che porta a un ambiente non sufficientemente riverberante. Questo conferma che l'uso del solo agitatore meccanico all'esterno della scatola di alluminio non è adatto ad effettuare misure di *SE* con il metodo delle *RC* annidate.



(a)



(b)

Figura 4.1.3.2 - Spettro in frequenza della *SE* di un foglio di ITO commerciale misurato con il metodo delle *RC* annidate (metodo *FS*) nelle configurazioni con (*bonded*) e senza contatto (*unbonded*). L'agility bandwidth è $\Delta\phi=200$ MHz, il numero di campioni equispaziati usati per il *FS* è $n_f=200$ (a) e $n_f=1000$ (b).

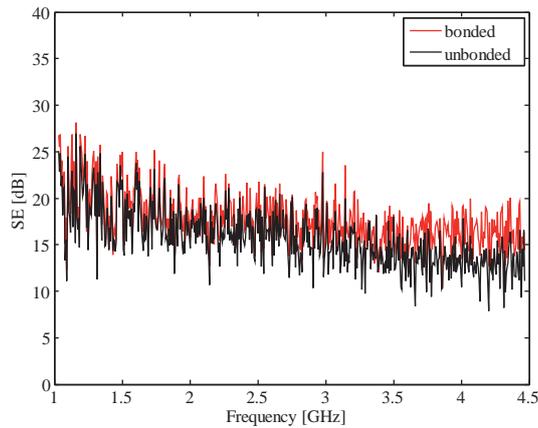


Figura 4.1.3.3 - Spettro in frequenza della SE di un foglio ci ITO commerciale misurato con il metodo delle RC annidate con agitazione meccanica dei modi nella RC esterna, nelle configurazioni con (bonded) e senza contatto (unbonded).

Agitazione dei modi ibrida

Infine, la SE è stata misurata con le RC annidate applicando contemporaneamente l'agitazione meccanica e il FS. I dati misurati vengono mediati su una agility bandwidth $\Delta\phi=200$ MHz, considerando $n_f=1000$ campioni in ciascun intervallo largo $\Delta\phi$, e su 25 posizioni dell'agitatore.

Gli spettri ottenuti di figura 4.1.3.4 dimostrano che l'approccio ibrido contribuisce a migliorare la misura. Inoltre risulta che la SE nella configurazione con contatto ben si correla con quella di figura 4.1.3.2, a meno di 5 dB.

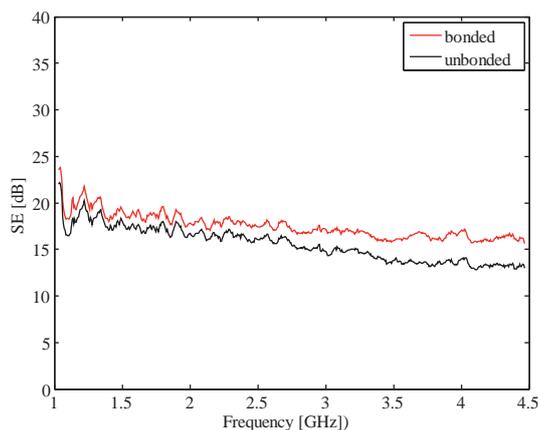


Figura 4.1.3.4 - Spettro in frequenza della SE di un foglio di ITO commerciale misurato con il metodo delle RC annidate (metodo ibrido), nelle configurazioni con (bonded) e senza contatto (unbonded). L'agility bandwidth è $\Delta\phi=200$ MHz, il numero di campioni equispaziati usati per il FS è $n_f=1000$ e il numero di posizioni dell'agitatore meccanico in una rotazione completa è 25.

4.1.4 Calcolo di SE con metodo numerico 3D-FDTD

Si consideri le configurazioni di figura 4.1.4.1. Sono state effettuate le simulazioni numeriche applicando il metodo tridimensionale alle differenze finite nel dominio del tempo (*FDTD*) descritto in precedenza [11]. La scatola di 70 cm di lato è stata discretizzata usando un passo spaziale di 1.67 cm. Le pareti di alluminio spesse 3 mm sono state considerate come conduttori elettrici perfetti (*PEC*), mentre il pannello schermante è stato simulato considerando la conducibilità elettrica $\sigma_{dc}=150$ kS/m misurata con il metodo a quattro punte. Le condizioni al contorno *UPML* sono posizionate a sei celle dal modello discretizzato della scatola, che è ipotizzata appoggiata su un piano *PEC* infinito. Sono state simulate entrambe le configurazioni della scatola rappresentate nelle figure 2.13 (a) e (b). La scatola è illuminata da un'onda piana incidente perpendicolarmente alla faccia con l'apertura.

I calcoli sono stati effettuati considerando un passo temporale di 27.9 ps e per 600000 iterazioni. Per ottenere una stima mediata delle prestazioni della scatola, la *SE* è stata valutata nei nove punti riportati in tabella 4.1.4.1. I dati ottenuti sono stati quindi mediati per calcolare il valor medio della *SE*.

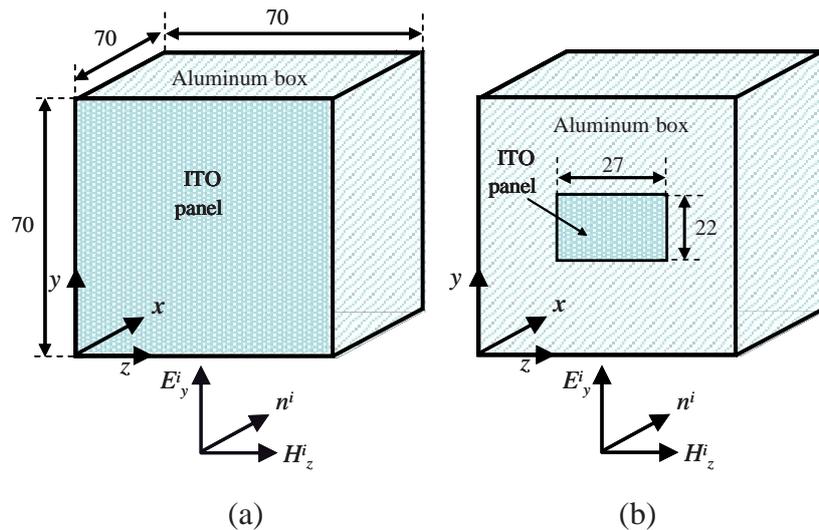
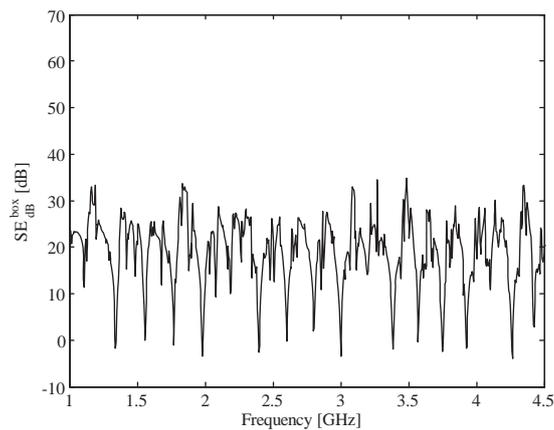


Figura 4.1.4.1 - Configurazione schematica delle scatole modellizzate illuminate da un'onda piana (dimensioni in cm): a) pannello di ITO di 70 cm \times 70 cm; b) pannello di ITO 27 cm \times 22 cm.

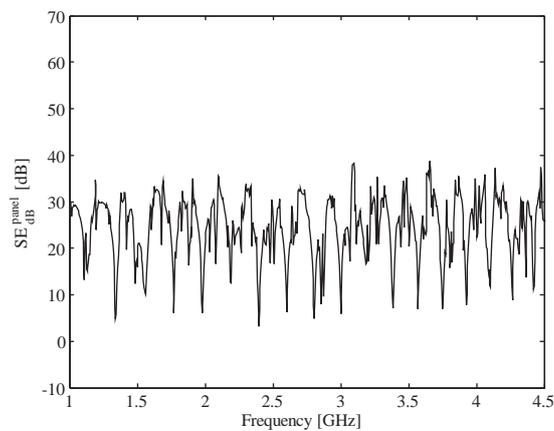
Tabella 4.1.4.1 - Coordinate dei n. 9 punti di osservazione per il calcolo della SE.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
x [cm]	35	35	35	45	45	45	58	58	58
y [cm]	26	26	26	40	40	40	47	47	47
z [cm]	35	35	35	35	35	35	35	35	35

In primo luogo viene considerato il set-up di figura 4.1.4.1 (a). Gli spettri in frequenza della SE mediati della scatola e del pannello di ITO di 70 cm × 70 cm sono mostrati rispettivamente nelle figure 4.1.4.2 (a) e (b). Le caratteristiche multirisonanti delle curve ottenute sono dovute al fatto che nell'intervallo di frequenze considerato da 1 GHz a 4.5 GHz, la scatola ed il pannello sono elettricamente grandi. Per la stessa ragione si nota che la SE mediata del pannello di ITO è di circa 5 dB maggiore della SE della scatola PEC con un intero lato fatto di policarbonato rivestito di ITO.



(a)



(b)

Figura 4.1.4.2 - Spettro in frequenza della SE della scatola (a) e del pannello di ITO di 70 cm di lato (b) di figura 4.1.4.1 (a).

I calcoli sono stati quindi ripetuti considerando la configurazione di figura 4.1.4.1(b), in cui l'apertura è chiusa con il pannello di ITO di dimensioni 27 cm × 22 cm. Risulta che in media la SE della scatola (figura 4.1.4.3a) è più elevata della SE del pannello di dimensioni finite (figura 4.1.4.3b). Inoltre, la SE della scatola è caratterizzata da un andamento decrescente poiché per frequenze fino a 1 GHz – 2 GHz, l'apertura non è elettricamente grande. A frequenze più elevate gli spettri sono molto simili. Dal confronto degli spettri si può notare che in media, la SE del pannello più piccolo (27 cm × 22 cm) è più elevata di quella del pannello più grande (70 cm × 70 cm) di circa 1-2 dB.

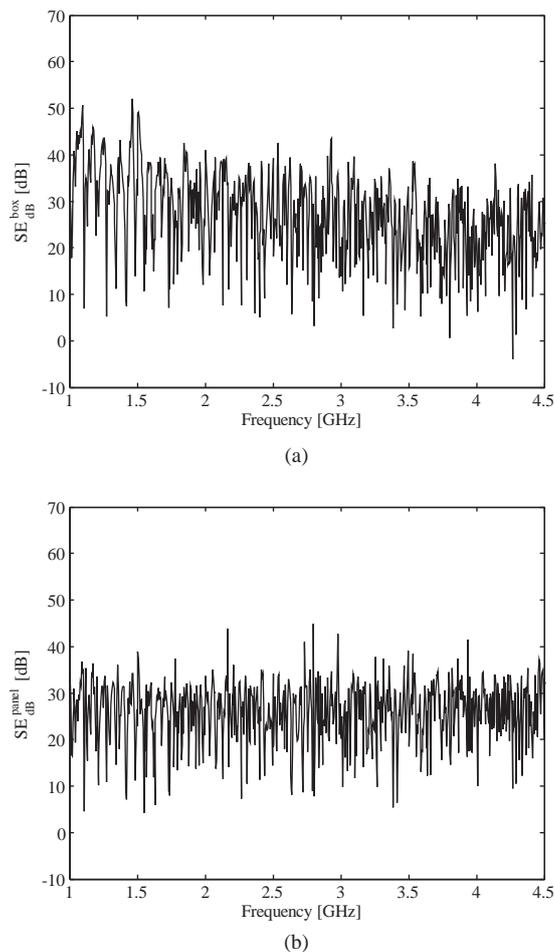


Figura 4.1.4.3 - Spettro in frequenza della SE della scatola (a) e del pannello di ITO 27 cm × 22 cm (b) di figura 4.1.4.1 (b).

4.2 Caratterizzazione di schermi trasparenti basati su pellicole commerciali

Sono state analizzate alcuni campioni di pellicole commerciali utilizzate normalmente per la schermatura dell'irraggiamento solare all'infrarosso. La figura 4.2.1 evidenzia la trasparenza delle pellicole che possono essere applicate su normali vetri senza particolari interventi sulle strutture portanti; non sono state fornite le caratteristiche costruttive delle pellicole.

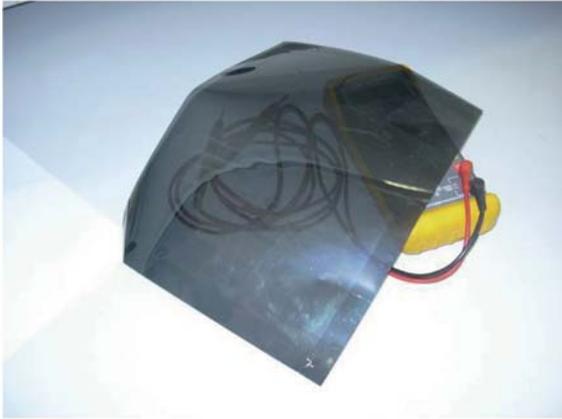


Figura 4.2.1 - *Campioni di pellicole analizzate.*

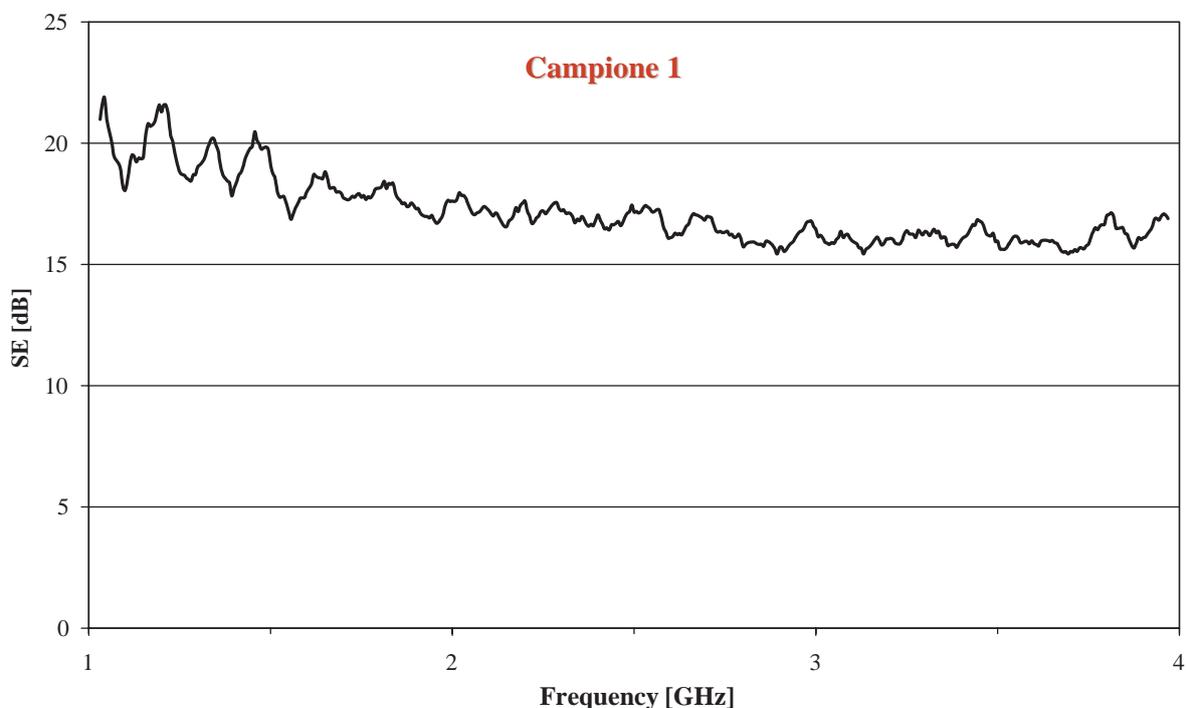
Le proprietà filtranti di tali pellicole vengono ottenute attraverso film sottili multistrato in cui ogni strato assolve a particolari funzioni. Solitamente l'isolamento all'infrarosso è dovuto ad uno o più strati metallici costituenti la pellicola. Si è ritenuto che gli strati metallici delle pellicole possano avere anche proprietà schermanti nei confronti del campo elettromagnetico a radio frequenza e pertanto sono state effettuate misure di *SE* in camera riverberante ed in cella coassiale.

Le impostazioni utilizzate per eseguire le misure in camera riverberante sono:

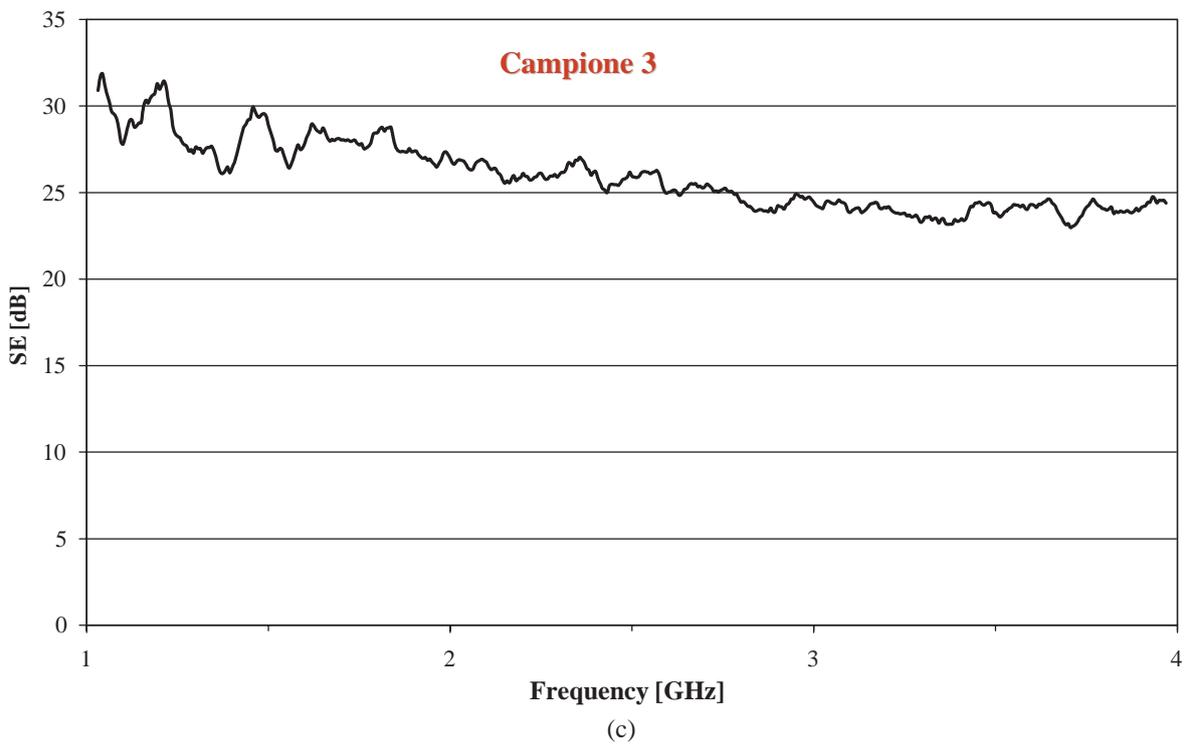
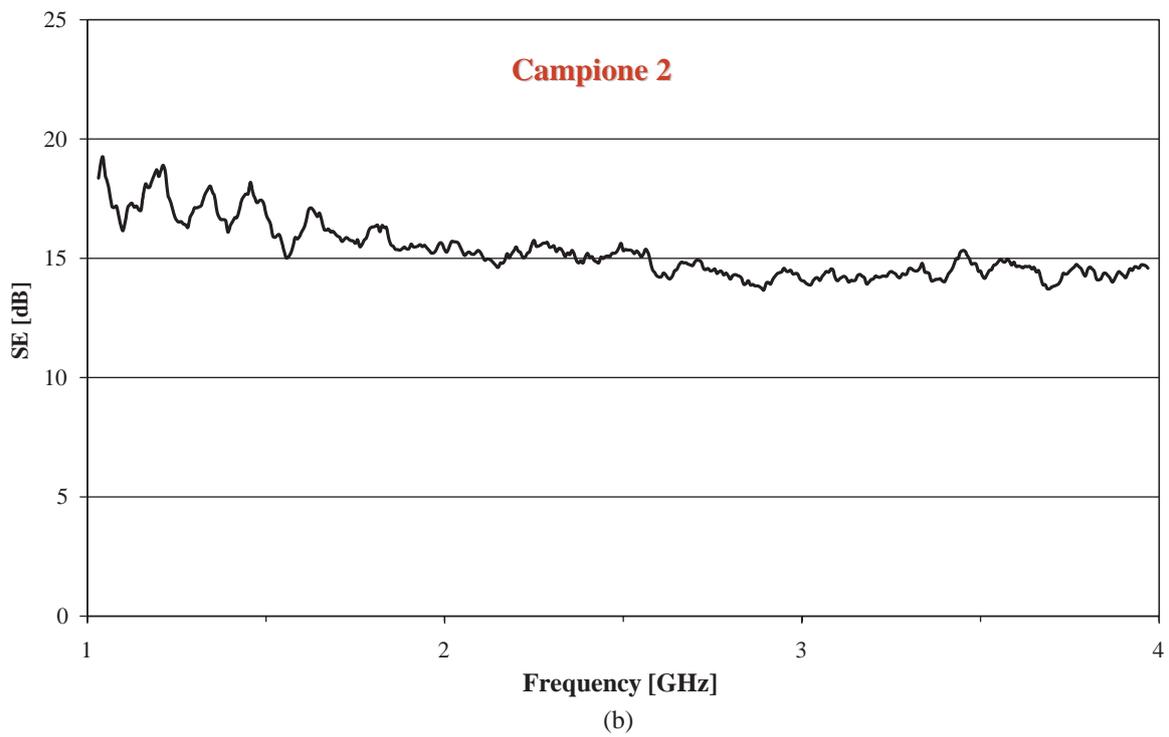
- agility bandwidth: $\Delta\phi = 200$ MHz;
- numero di punti di frequenza: $n_f = 1000$;
- numero di passi dello stirrer per ottenere una rotazione completa: 25.

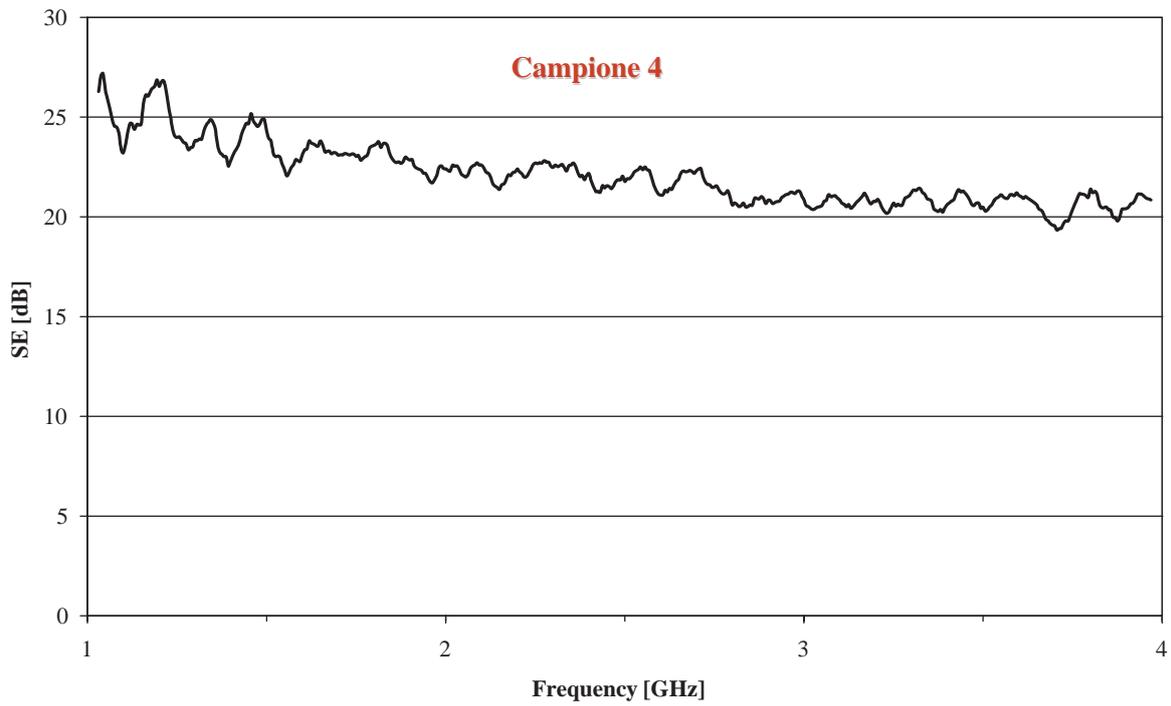
Le figure 4.2.2 (a)-(e) mostrano gli spettri in frequenza tra 1 GHz e 4 GHz della *SE* misurata per le diverse pellicole. Tutti i risultati sono quindi presentati in figura 4.2.3 per facilitarne il confronto.

Le misure di *SE* ripetute in cella coassiale sono presentate in figura 4.2.4. Nella stessa figura sono riportati per confronto i valori di *SE* stimati in camera riverberante ad 1 GHz. È importante sottolineare che i risultati ottenuti con i due metodi di misura dovrebbero essere simili ma non necessariamente identici poiché si riferiscono a campi incidenti diversi (per angolo e polarizzazione). Inoltre, si noti che poiché gli strati superficiali delle pellicole sono isolanti le prestazioni mostrate non sfruttano l'effetto positivo del bonding della parte conduttiva, rilevato per l'ITO.

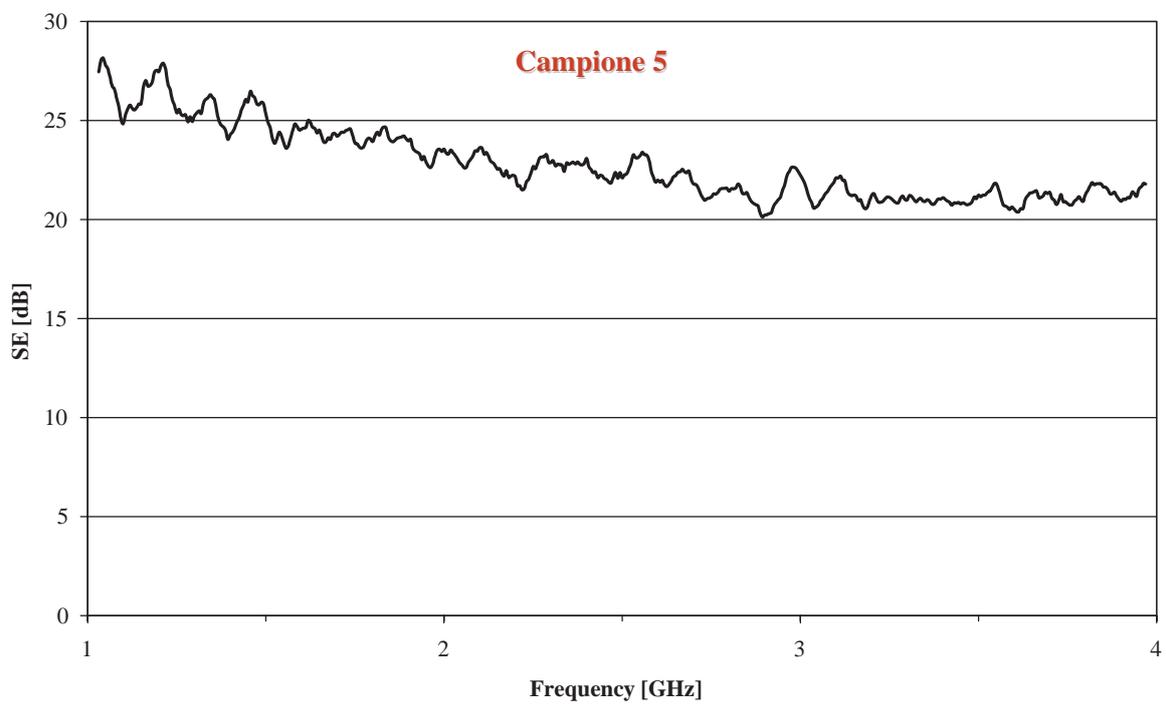


(a)





(d)



(e)

Figura 4.2.2 Spettri in frequenza di SE misurati per i campioni di pellicole di figura 4.2.1.

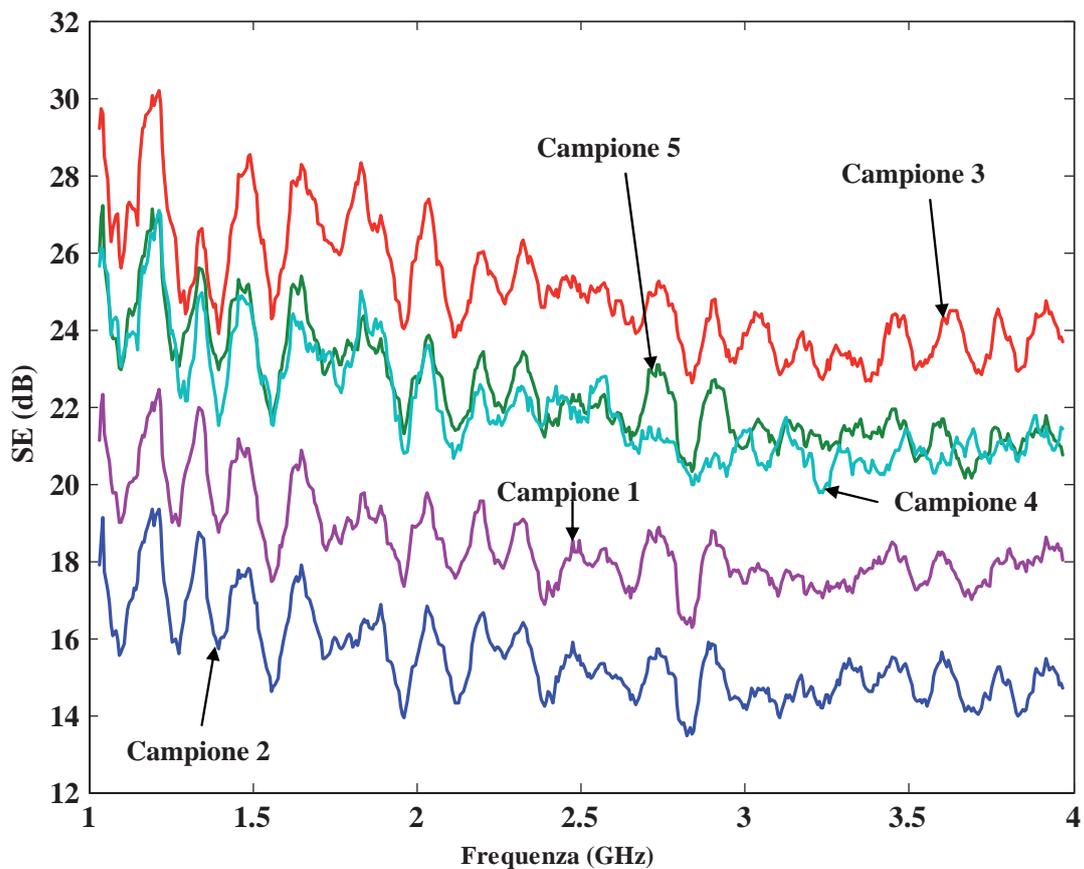


Figura 4.2.3 - Spettri in frequenza di SE misurati per i campioni di pellicole di figura 4.2.1.

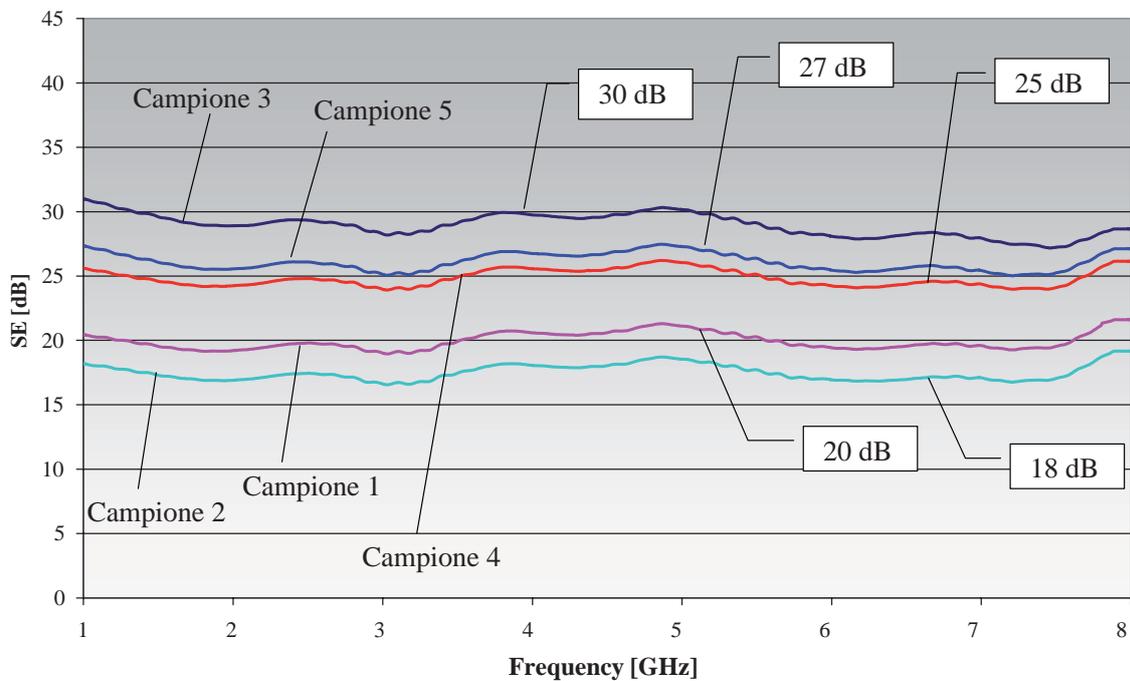


Figura 4.2.4 - Spettri in frequenza di SE misurati in guida d'onda per i campioni di pellicole di figura 4.2.1. Le misure ottenute in guida sono confrontate con il valore stimato in camera risonante ad 1 GHz.

5 Conclusioni

I dati acquisiti relativi alle caratteristiche di vetri commerciali schermanti il campo elettromagnetico a radio frequenza mostrano una limitata produzione ed una certa approssimazione nella definizione delle prestazioni schermanti che risultano di accettabile livello per vetri con griglia metallica a scapito tuttavia della trasparenza ottica. I prodotti analizzati sono di ditte operanti negli USA e in Germania.

Notevole impegno è stato dedicato alla definizione ed attuazione dei metodi di misura dell'efficienza di schermatura di film sottili, basati sulla determinazione della *sheet-resistance*, sull'uso di guida d'onda coassiale e di camere riverberanti annidate. Le tecniche sviluppate consentono di eseguire il confronto dei dati misurati a garanzia dell'accuratezza, dell'affidabilità e della ripetibilità.

Le procedure di calcolo sviluppate consentono di predire l'efficienza di schermatura di film sottili nella configurazione ideale di schermo indefinito con campo elettromagnetico incidente in direzione normale, configurazione conforme al confronto con i dati misurati, ed anche nel set-up costituito da una struttura scatolare con apertura rivestita con pannello schermante trasparente.

È stata poi misurata e calcolata l'efficienza di schermatura di campioni commerciali. È stato analizzato un foglio di policarbonato commerciale di spessore 175 μm rivestito su una delle due superfici da ITO spesso 0.5 μm . Le misure eseguite utilizzando i tre metodi sopra citati tra 1 GHz e 4.5 GHz hanno mostrato un soddisfacente accordo dei risultati ottenuti; si prevede di eseguire in seguito misure in un campo di frequenze di valore inferiore. Notevole accordo è stato riscontrato con i dati ottenuti mediante la simulazione numerica *3D-FDTD*.

Infine si è proceduto alla misura dell'efficienza di schermatura di pellicole commerciali prodotte da alcune ditte per la schermatura dell'irraggiamento solare all'infrarosso. I risultati ottenuti, variabili tra 30 dB e 15 dB per frequenza tra 1 GHz e 4-8 GHz, sono di interesse in quanto evidenziano una prestazione elettromagnetica non nota agli stessi produttori. Si prevede di attivare una collaborazione con una ditta fornitrice di pellicole per eseguire misure su campioni di dimensioni conformi all'installazione su finestre.

A corredo delle attività descritte sono stati eseguiti ulteriori studi per la predizione numerica delle prestazioni schermanti di vetri nanostrutturati o realizzati con ITO installati sull'apertura di strutture scatolari investite da un impulso elettromagnetico con tempo di salita di alcuni nanosecondi in gradoni eccitare frequenze fino a qualche centinaia di megahertz.

Riferimenti bibliografici

- [1] C. G. Granqvist, A. Hultaker, "Transparent and conducting ITO films", *Thin Solid Films*, Vol. 411, 2002, pp. 1-5.
- [2] ASTM Standard F390-98, "Standard test method for sheet resistance of thin metallic films with a collinear four-probe array".
- [3] ASTM Standard D4935-89, "Standard test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials".
- [4] IEC 61000-4-21, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-21: "Testing and measurements techniques – Reverberation chamber test methods", May 2005.

-
- [5] IEEE Std 299-2006, IEEE: Standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures, 28 Feb. 2007.
- [6] M.S. Sarto, “*Electromagnetic shielding of thermoformed lightweight plastic screens*”, IEEE Trans. on EMC, Nov. 2004.
- [7] M.S. Sarto, A. Tamburrano, “*An innovative test method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range*”, IEEE Trans. on EMC, May 2006.
- [8] C.L. Holloway, D.A. Hill, J. Ladbury, G. Koepke, R. Garzia, “*Shielding effectiveness measurements of materials using nested reverberation chambers*”, IEEE Transactions on EMC, Vol. 45, No. 2, pp. 350 – 356, May 2003.
- [9] D.A. Hill, “*Electronic Mode stirring for reverberation chambers*”, IEEE Transaction on EMC, Vol. 36, No. 4, pp. 294-299, Nov. 1994.
- [10] T.A. Loughry, “*Frequency stirring: An alternate approach to mechanical mode-stirring for the conduct of electromagnetic susceptibility testing*”, Phillips Laboratory, Kirtland AFB, NM, Report No. PL-TR-91-1036, November 1991.
- [11] S.Greco, M.S. Sarto, A. Tamburrano, “*Shielding performances of ITO transparent windows: theoretical and experimental characterization*”, EMC Europe 2008, Hamburg, Sept. 9-12, 2008.
- [12] M. D’Amore, S. Greco, M.S. Sarto, “*Transparent electromagnetic shielding of enclosures against EMP penetration*”, EUROEM 2008, Lausanne, July 20-25, 2008.
- [13] M. D’Amore, S. Greco, M.S. Sarto, “*Nanostructured transparent shielding of enclosures with aperture against EMP penetration*”, URSI GA 2008, Chicago, Aug. 7-16, 2008.

RAPPORTO ATTIVITÀ C

INTRODUZIONE

I risultati delle misure e delle simulazioni eseguite su campioni commerciali sono stati utilizzati per la realizzazione di prototipi, sui quali sono stati eseguiti test elettromagnetici, ottici e meccanici. Sono stati sviluppati ed implementati codici di calcolo e di progetto per la simulazione elettromagnetica di strutture multistrato a radiofrequenza e alle frequenze ottiche.

Sono state quindi definite le specifiche di progetto di schermi su substrato vetroso e sono stati realizzati dei prototipi tramite l'utilizzo di vetri commerciali appositamente modificati.

È stato inoltre realizzato un tool per la progettazione assistita da calcolatore degli schermi. Successivamente si è proceduto alla progettazione e realizzazione di prototipi di schermi trasparenti nanostrutturati con riferimento ai requisiti tecnici e alla stima dei costi richiesti per la realizzazione di campioni.

1 Realizzazione e caratterizzazione sperimentale di campioni di vetri commerciali modificati

1.1 Prestazioni elettromagnetiche e ottiche di pellicole commerciali

Sono state eseguite ulteriori misure di efficienza di schermatura (SE) su campioni di pellicole commerciali, utilizzate normalmente per la schermatura dell'irraggiamento solare all'infrarosso, oltre a quelle descritte nel precedente Rapporto sull'Attività B.

A ciascuna i -esima pellicola è stato assegnato il codice identificativo "Fi", secondo la rappresentazione di Tabella 1.1.1, ed è stata associata una lettera che ne indica la tipologia costruttiva. Ad esempio è stata associata la lettera B alle pellicole della famiglia Century Nova costituite da un doppio strato con tripla metallizzazione nichel-argento-nichel: tali pellicole sono tra le più interessanti e più utilizzate nelle applicazioni proposte.

Le misure sono state eseguite utilizzando la tecnica in guida d'onda coassiale sviluppata dai ricercatori del CNIS presso il Laboratorio EMC del Dipartimento di Ingegneria Elettrica, in accordo allo standard ASTM-D-4935 "Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials" [1].

La tabella 1.1.1 riporta la SE media misurata di differenti pellicole prodotte da diversi costruttori, tra le quali quelle fornite dalla ditta SUN-GARD, per frequenze comprese tra 500 MHz e 8 GHz. La *sheet resistance* equivalente R_{sheet} della pellicola è ottenuta dall'espressione della efficienza di schermatura di film sottili descritta nel precedente Rapporto:

$$SE_{dB} \cong 45.51 - 20 \log_{10} (R_{sheet}) \quad (1.1)$$

Si ha infatti:

$$R_{sheet} = 10^{\frac{45.51 - SE_{misurata}}{20}} \quad (1.2)$$

La stessa tabella 1.1.1 mostra i valori della trasmittanza ottica nel visibile T_v riportati nei datasheet della Società SUN-GARD. La trasmittanza T_v è data dall'integrale (espresso in forma discreta) della trasmittanza spettrale del materiale pesata dallo spettro solare medio e dalla curva di sensibilità dell'occhio umano [2]-[5]. La definizione di questo e di altri parametri ottici e termici secondo gli standard internazionali è descritta in Appendice A.

La tabella 1.1.1 riporta anche il fattore di trasmissione dell'energia solare totale g (comunemente detto "fattore solare"), il parametro ottico-termico utilizzato nelle specifiche tecniche in quanto fornisce una valutazione della potenza solare trasmessa all'interno attraverso la finestra. Il fattore g viene calcolato come somma del fattore di trasmissione solare diretta e del fattore di scambio termico secondario della vetrata verso l'interno (vedi Appendice A); un buon controllo termico del vetro richiede un basso valore del fattore g .

Tabella 1.1.1 - Efficienza di schermatura (SE_{dB}), sheet resistance (R_{sheet}), trasmittanza ottica percentuale nel visibile (T_v) e fattore solare (g) delle pellicole analizzate.

Pellicola commerciale	Codice	Tipologia	SE (dB)	R_{sheet} (Ω /Square)	T_v (%)	g
Solar Bronze 20	F1	A	29.56	6.3	17.5	0.2
Century Nova 35	F2	B	28.59	7.0	32.1	0.3
Century Nova 50	F3	B	25.62	9.9	50.1	0.4
Solar Bronze 35	F4	A	24.47	11.3	37	0.3
Solar Bronze 50	F5	A	21.85	15.2	48.2	0.4
Argent 65	F6	C	21.85	15.2	66	0.5
Century Nova 70	F7	B	19.97	18.9	68.1	0.5
Optima Exterior 22	F8	D	17.24	25.9	22	0.3
Stainless Steel Exterior 20	F9	E	6.77	86.5	24.3	0.4
Century Signature 20	F10	F	6.37	90.6	17.9	0.3
Century Signature 35	F11	F	3.58	124.9	33.3	0.4
Endurance 38	F12	G	2.8	136.6	38.5	0.5
Stainless Steel Exterior 35	F13	E	2.6	139.8	33.9	0.5
Endurance 50	F14	G	1.92	151.2	48.3	0.6
IQue 78FG	F15	H	19.9	19.1	77	0.55
IQue 68P	F16	H	18.1	23.5	65	0.48
IQue 53II	F17	H	16.1	29.5	58	0.44

Le prestazioni ottiche ed elettromagnetiche dipendono dal materiale, dallo spessore e dal numero di strati dei film realizzati: per la stessa tipologia di film la SE più elevata è normalmente caratterizzata da una bassa trasmittanza. I dati in tabella 1.1.1 sono rappresentati anche nel diagramma $SE-T_v$ di figura 1.1.1. Il diagramma permette di identificare la correlazione esistente tra la SE e la trasparenza di film della stessa tipologia; la curva tratteggiata si riferisce a pellicole della famiglia Century Nova (tipologia B).

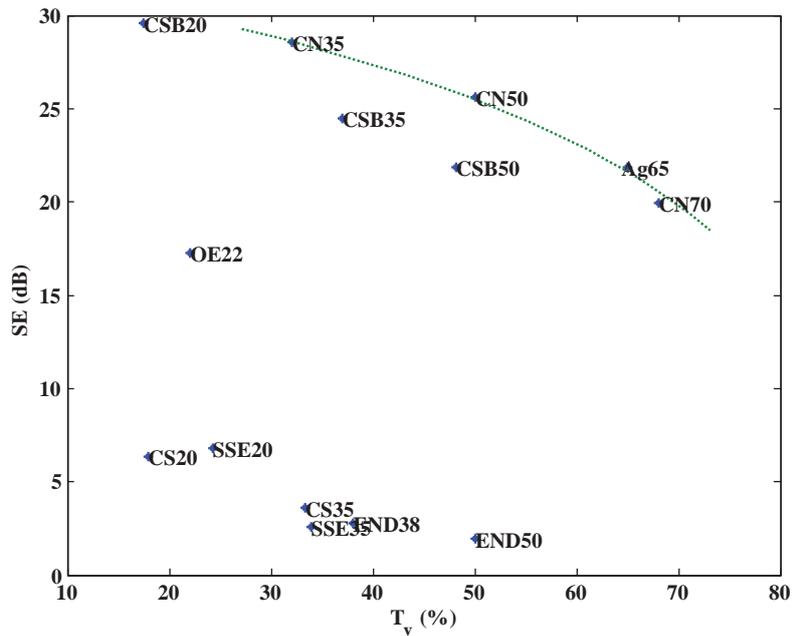


Figura 1.1.1 - Diagramma dei valori di SE e trasparenza ottica dei film SUN-GARD. La curva tratteggiata si riferisce alle pellicole del tipo Century Nova (tipologia B).

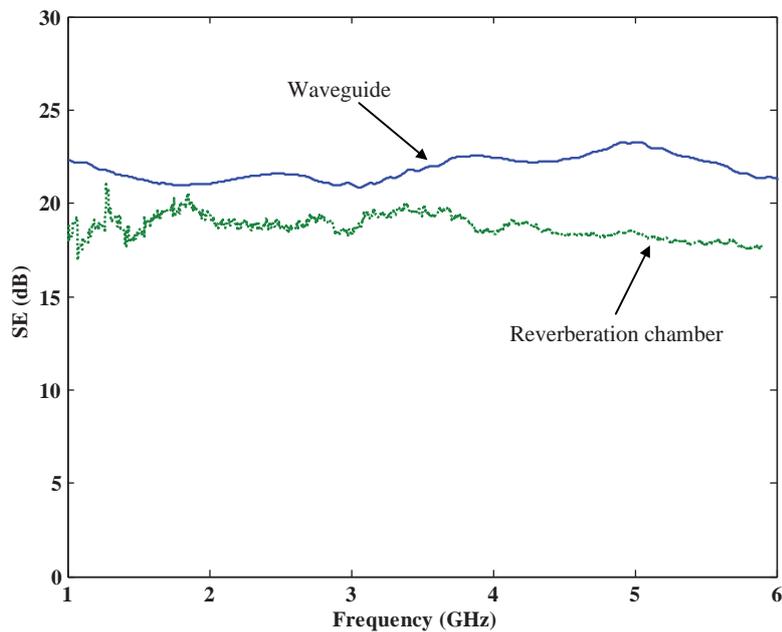


Figura 1.1.2 - Confronto tra gli spettri in frequenza del film Argent 65 (F6, tipologia C) misurati in camera riverberante e in guida d'onda.

La SE è stata misurata anche in camera riverberante (RC) secondo la procedura descritta nel precedente Rapporto. La figura 1.1.2 mostra lo spettro misurato in camera riverberante tra 1 GHz e 6 GHz per il film Argent 65 (F6, tipologia C). Lo spettro ottenuto è confrontato con quello

misurato in guida d'onda. I risultati non sono coincidenti in quanto i due set-up usano differenti condizioni di riferimento: la misura in camera riverberante fornisce una sorta di valutazione di *SE* del caso peggiore in cui il campo incide da tutte le direzioni.

1.2 Misura dell'efficienza di schermatura di campioni di finestre

Sono state eseguite misure di *SE* di tre finestre di dimensioni 120 cm x 80 cm simili a quelle di uso commerciale, consistenti di una cornice di alluminio dello spessore di 4 cm e di un vetro dello spessore di 6 mm coperto rispettivamente dai film Century Nova 50 (F3, tipologia B), Century Nova 35 (F2, tipologia B) e Argent 65 (F6, tipologia C). La figura 1.2.1 mostra l'immagine della finestra con la pellicola Century Nova 50.

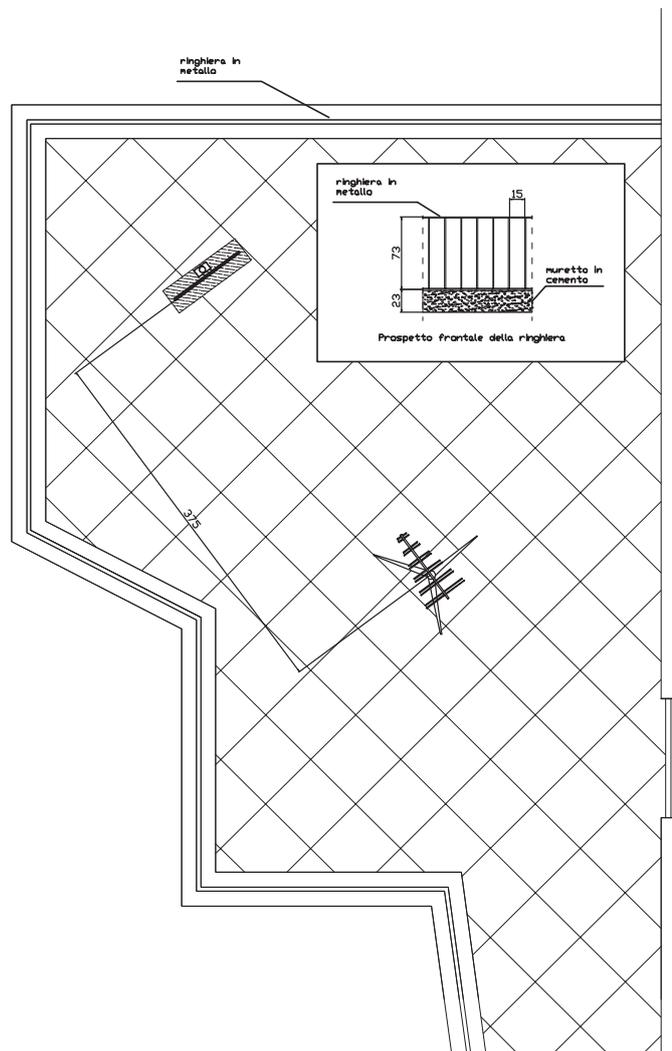
Sono state eseguite diverse sessioni di misura oltre che nel laboratorio EMC anche in ambiente aperto allo scopo di ridurre i problemi dovuti alla presenza di strutture metalliche, ai cammini multipli e alle riflessioni delle pareti. In entrambi gli ambienti è stato effettuato il monitoraggio del campo elettromagnetico di fondo. A seconda del range di frequenza di prova sono stati utilizzati diversi tipi di antenne (attive a loop, biconiche, log-periodiche, horn piramidali e horn coniche). Per calcolare la distanza alla quale posizionare le antenne rispetto alla finestra, è stata calcolata la condizione di campo lontano, in maniera tale da poter considerare l'onda incidente piana. La figura 1.2.2 rappresenta la pianta del sito aperto (terrazzo del Dipartimento di Ingegneria Elettrica) e la configurazione schematica delle antenne utilizzate. Le figure 1.2.3 e 1.2.4 mostrano rispettivamente la foto di una finestra in laboratorio e la pianta con indicazione della posizione delle antenne che hanno consentito misure in campo lontano. Il posizionamento delle antenne è stato perfezionato con un puntatore laser sia per quanto riguarda l'allineamento dei coni che per quello della finestra.

L'attenuazione del campo elettrico è definita dal rapporto tra il livello misurato dal sensore nel punto di osservazione in assenza e in presenza della finestra. L'attenuazione varia a seconda delle caratteristiche e della distanza dell'antenna emittente. I tre spettri rappresentati in figura 1.2.5 sono stati misurati usando un'antenna horn posta a 1.5 m e 2.5 m dalla finestra. Per il primo caso sono mostrati sia la polarizzazione orizzontale che quella verticale dell'antenna. La forte variabilità in frequenza dell'attenuazione di campo elettrico è dovuta soprattutto alla propagazione multi-path prodotta dalla direttività non ideale delle antenne usate e dalle riflessioni del pavimento.

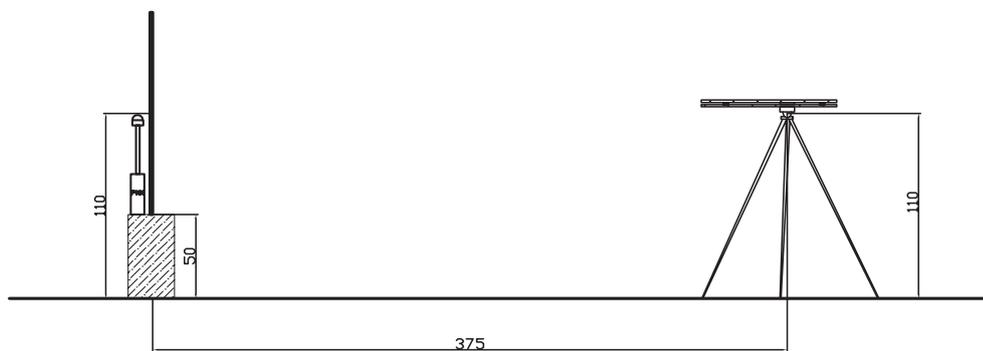
È da notare come la prestazione schermante della finestra in generale può essere fortemente influenzata dalla condizione di bonding della pellicola schermante sulla cornice in alluminio della finestra e dalla messa a massa dello stesso. Nel caso specifico un bonding per contatto diretto della parte conduttiva della pellicola alla cornice in alluminio della finestra non è possibile in quanto gli strati conduttivi della pellicola non sono contattabili in quanto ricoperti da strati protettivi dielettrici. Il bonding si realizza per accoppiamento capacitivo a partire da frequenze di circa un centinaio di MHz a causa della piccola distanza tra la pellicola applicata al vetro e la cornice metallica della finestra. Tale distanza è stimabile intorno al decimo di millimetro, mentre la superficie di sovrapposizione tra pellicola e cornice metallica della finestra è dell'ordine del centimetro per unità di lunghezza. Ciò corrisponde ad una capacità per unità di lunghezza di circa $0.27 \mu\text{F}/\text{m}$. Per la finestra di figura 1.2.1, di dimensioni 120 cm x 80 cm, la capacità totale di bonding è di circa $1.08 \mu\text{F}$, la quale corrisponde alla frequenza di 100 MHz ad una impedenza capacitiva di bonding in modulo pari a circa 0.16Ω .



Figura 1.2.1 - *Set-up di misura della finestra con cornice di alluminio e con la pellicola Century Nova 50 (F3, tipologia B) nel laboratorio EMC.*



(a)



(b)

Figura 1.2.2 - Pianta (a) e prospetto (b) della configurazione di misura eseguita sulle finestre in campo aperto.

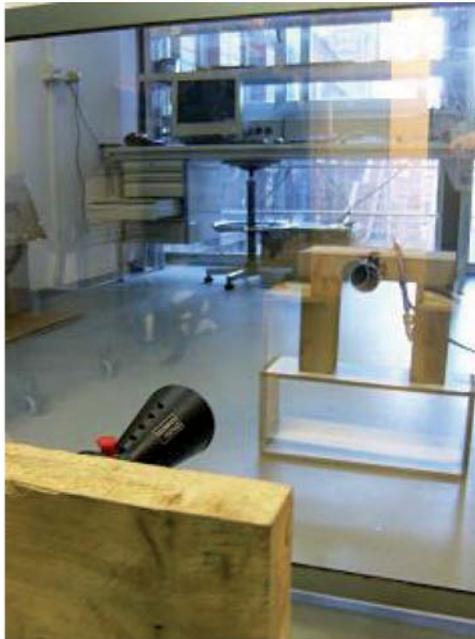


Figura 1.2.3 - *Set-up di misura della finestra con la pellicola Century Nova 50 (F3, tipologia B) durante le misure effettuate all'interno del laboratorio EMC con antenne horn.*

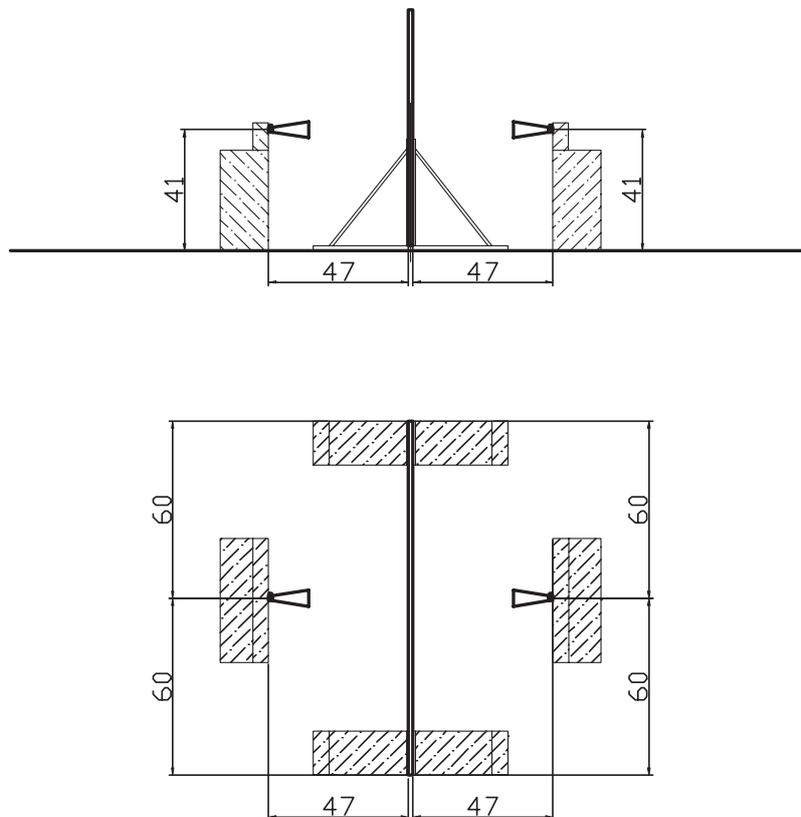


Figura 1.2.4 - *Schema della configurazione di misura riportata in figura 1.5.*

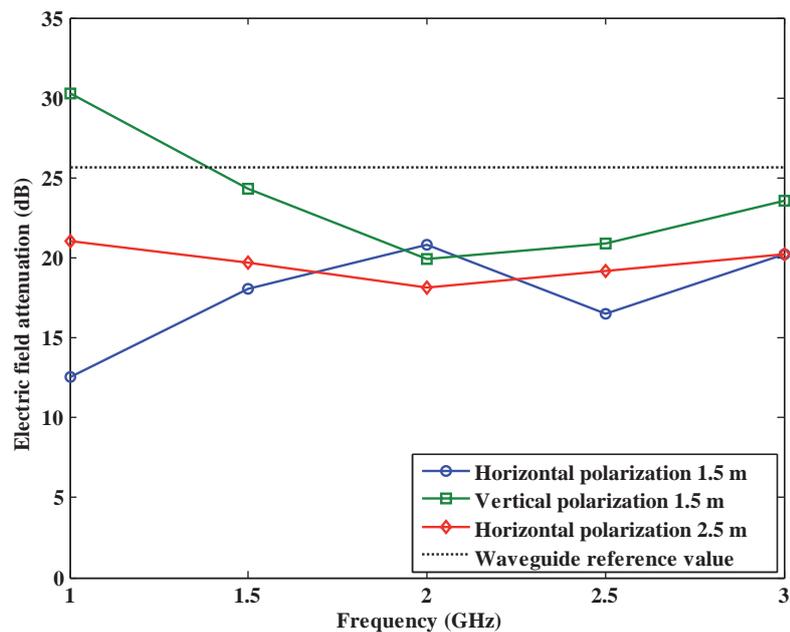


Figura 1.2.5 - Spettri in frequenza dell'attenuazione di campo elettrico prodotta dalla finestra ricoperta con film Century Nova 50 (F3, tipologia B).

1.3 Progetto di strutture a sandwich con pellicole commerciali

1.3.1 Caratteristiche costruttive delle strutture analizzate

I dati ottenuti per le pellicole analizzate sono stati utilizzati per progettare ed ottimizzare tramite simulazioni numeriche alcune strutture a “sandwich” con l’obiettivo di migliorare le prestazioni schermanti e di controllo termico, senza compromettere la trasparenza nel visibile. Nella sigla di ciascuna struttura sono indicate le lettere associate alle pellicole considerate. Le strutture presentano le seguenti tipologie:

- **Pile** (sovrapposizione di più pellicole su un substrato di vetro), identificate con la sigla $Wp-Gd|Fi|Fj$ in cui Gd rappresenta lo spessore del vetro in mm ed Fi e Fj sono i codici delle pellicole secondo la nomenclatura in tabella 1.1.1;
- **Sandwich** (substrato di vetro incluso tra due pellicole), identificati con la sigla $Ws-Fi|Gd|Fj$;
- **Doppi vetri** (due substrati di vetro ognuno con una pellicola), identificati con la sigla $Wd-Gd_1|Fi|Vd_v|Gd_2|Fj$ con la possibilità di avere spessore diverso dei due vetri e intercapedine (vuota o con gas) tra i vetri come normalmente avviene nel vetrocamera commerciale. I doppi vetri possono presentare le pellicole su entrambe le facce esterne per facilitare l’installazione o solo dalla parte rivolta verso l’ambiente interno per rispettare il normale verso di installazione.

La simbologia utilizzata è descritta in tabella 1.3.1.1.

Tabella 1.3.1.1 - Simbologia utilizzata per l'identificazione delle strutture a sandwich.

Tipologia	Codice	Struttura
Pila	Gd Fi Fj	Esterno Vetro d mm Fi Fj Interno
Sandwich	Ws-Fi Gd Fj	Esterno Pellicola Fi Vetro d mm Pellicola Fj Interno
Doppi vetri	Wd- d_1 Fi Vd _v Gd ₂ Fj	Esterno Vetro d_1 mm Pellicola Fi Vuoto d mm → Vetro d_2 mm Pellicola Fj Interno

Le pellicole commerciali hanno normalmente una struttura che con buona approssimazione può essere definita simmetrica, hanno quindi prestazioni simili su entrambe le facce, anche se l'adesivo è posto su una sola la faccia. Esistono tuttavia particolari tipi di pellicole, dette "dual reflectance", caratterizzate da riflettanze "forward" e "backward" alquanto diverse sulle due facce, particolarmente adatte alla visione notturna.

Lo strato adesivo di una pellicola può essere predisposto per l'installazione sulla faccia esterna del vetro oppure su quella interna. Una pellicola da interno si può differenziare da una da esterno per i seguenti aspetti:

- il rivestimento anti-graffio sulla faccia esterna è utile per aumentare la durata di tutte le pellicole ed è più consistente nelle pellicole esposte agli agenti esterni; il rivestimento non dovrebbe avere effetti elettromagnetici ed ottici in quanto si utilizzano materiali con caratteristiche ottiche simili a quelle del vetro;
- il filtro anti-ultravioletto, posto prima degli strati metallici, è spostato nelle pellicole da esterno rispetto a quelle da interno;
- la riflettanza ottica, di solito ottimizzata per uno solo lato (di solito quello rivolto verso l'ambiente interno), si differenzia per i due lati solo per qualche percento, tranne che in alcune pellicole particolari;
- le pellicole da interno non possono normalmente assorbire troppo calore poiché si manifesterebbe un elevato shock termico nel vetro su cui sono installate.

Le pellicole da interno presentano vantaggi economici non solo perché non possiedono il trattamento anti-graffio, ma anche perché possono essere installate in qualsiasi condizioni meteorologica, anche avversa, senza l'utilizzo di impalcature. Le pellicole presentate in tabella 1.1.1 sono adatte all'installazione sulla parte interna del vetro tranne quelle indicate con le sigle F8, F9 e F13. Si deve rilevare che nelle simulazioni effettuate non si è tenuto conto del fatto che una pellicola fosse per installazione esterna od interna. Infatti il trattamento superficiale non introduce alcuna differenza dal punto di vista elettromagnetico. Naturalmente una pellicola progettata per interni può ridurre la propria durata se messa a contatto con agenti atmosferici. Per questo motivo occorre porre attenzione nella scelta delle pellicole per l'eventuale uso esterno (pellicole tipo A). D'altra parte installare una pellicola per uso esterno all'interno comporta problemi dovuti all'eccessivo gradiente termico del vetro, soprattutto nel caso di vetrocamera. Questo è il motivo per cui pellicole pensate per uso interno come quelle della tipologia B limitano l'assorbimento dividendo la protezione in una tripla metallizzazione nichel-argento-nichel: il primo strato di nichel assorbe l'energia solare piuttosto che rifletterla, il secondo strato di argento ha il compito di riflettere, il terzo strato di nichel protegge dal calore solare residuo. In generale i produttori forniscono normalmente garanzie anche di 10-15 anni per le pellicole montate se-

condo le loro istruzioni. Gli stessi produttori interpellati su questo problema stimano che una pellicola da interno montata all'esterno può durare molto meno in assenza di trattamenti specifici, soprattutto per l'ossidazione dei metalli come l'argento. Tuttavia, se si isolano bene i bordi della pellicola rispetto alle sollecitazioni prodotte dall'azione degli atmosferici esterni, per esempio con una guarnizione di silicone, la pellicola può rimanere integra anche per 4-5 anni. Dati i costi ridotti rispetto alla sostituzione delle intere finestre o vetrate, rimane comunque sempre aperta la possibilità di sostituire le pellicole usurate. Queste considerazioni hanno indotto i produttori a mettere sul mercato pellicole che possano essere indifferentemente montate all'interno o all'esterno facilitando il compito degli installatori. Tali pellicole subiscono un aggravio di costo del 20-30%. A titolo esemplificativo e con lo scopo di verificare effettivamente la prestazione di riflettanza ottica, nelle simulazioni sono state anche considerate strutture contenenti pellicole "girate", ovvero installate ipotizzando di applicarle sul vetro dalla parte della faccia priva di adesivo, identificate con la lettera "r"; in questo caso, la SE e la trasmittanza sono identiche, mentre la riflettanza e il fattore solare sono in generale diversi.

Infine, nella scelta della configurazione occorrerebbe tenere conto anche di considerazioni di carattere economico, in quanto il costo delle pellicole può variare da una tipologia all'altra. Per fornire una idea, si può affermare che tale costo è compreso tra i 50 €/m² e i 150 €/m², incluse le costose spese di installazione.

1.3.2 Procedura di simulazione delle prestazioni elettromagnetiche

La simulazione di strutture multistrato per la determinazione dell'efficienza di schermatura è effettuata utilizzando la procedura analitica descritta nel precedente Rapporto. Si riporta per comodità l'espressione di SE valida per $\eta_0 d \sigma / 2 \gg 1$, espressa dalla (1.1):

$$SE_{dB} \cong 20 \log_{10} \left(\frac{\eta_0 d \sigma}{2} \right) = 45.51 + 20 \log_{10} (\sigma d) \quad (1.3)$$

Si rammenta che essa rappresenta il valore asintotico dell'efficienza di schermatura per frequenza che tende a zero. Poiché la *sheet-resistance* vale

$$R_{sheet} = \frac{1}{\sigma d} \quad (1.4)$$

la (1.3) può esprimersi anche nella seguente forma:

$$SE_{dB} \cong 45.51 - 20 \log_{10} (R_{sheet}) \quad (1.5)$$

Dalla misura di SE si può ottenere con la (1.2) la *sheet resistance* equivalente di una pellicola. Inoltre, è possibile definire la conducibilità equivalente della pellicola in funzione della stessa *sheet resistance* e dello spessore d :

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{R_{sheet} d} \quad (1.6)$$

Lo spessore di una pellicola è approssimativamente pari a 50 μm di cui meno del 10% è presumibilmente costituito da materiale conduttore. Quindi i valori di R_{sheet} e σ_{eq} ottenibili con tale procedura sono convenzionali in quanto la maggior parte dello spessore della pellicola è costituito da materiale dielettrico.

Il valore di SE dato dalla (1.3) si mantiene idealmente costante per un ampio intervallo di frequenze. La frequenza f^* fino alla quale la SE può essere considerata costante è diversa per le singole pellicole e per le strutture complesse contenenti le pellicole. Per un pannello omogeneo la SE inizia ad aumentare alla frequenza f^* che è inversamente proporzionale allo spessore d ed alla conducibilità del pannello. Poiché la profondità di penetrazione (*skin depth*) di un'onda elettromagnetica vale

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \pi f \sigma}} \quad (1.7)$$

alle frequenze $f > f^*$ per cui d soddisfa la condizione $d > 3\delta$ i fenomeni di assorbimento non possono essere trascurati, determinando $SE > SE_0$. Quindi si può assumere che

$$f^* = \frac{9}{\mu_0 \pi \sigma d^2} \quad (1.8)$$

Siccome per le pellicole in esame questo valore è nell'ordine del gigahertz, la SE può essere considerata costante e pari a SE_0 . In pratica, le misure effettuate presentano delle fluttuazioni dovute alla non uniformità delle pellicole, che sono in realtà formate da più strati, e all'incertezza insita nel set-up sperimentale [6]. Perciò nelle simulazioni delle strutture basate sulle pellicole si è usato un valore di conducibilità equivalente $\sigma_{eq}(f)$ funzione della frequenza.

I valori ottenuti di *sheet resistance* vengono utilizzati per il calcolo di SE di strutture complesse contenenti le pellicole. Si deve rilevare che la SE di strutture multistrato può ritenersi costante dalla continua fino a frequenze per le quali il fenomeno di schermatura è dominato dal coefficiente di riflessione. A frequenze maggiori di f^* in (1.8), per le quali lo spessore è più di tre volte la profondità di penetrazione, interviene anche il coefficiente di assorbimento che tende a modificare lo spettro della SE .

Gli strati di vetro presenti nelle strutture a sandwich sono caratterizzati da una conducibilità nulla e da un valore di permittività relativa ϵ_r che dipende dal tipo di vetro. Partendo dai dati reperibili in letteratura e da alcune misure effettuate nelle simulazioni sono stati usati valori tra 3 e 8. Il valore $\epsilon_r=4$ può essere assunto per i vetri commerciali in mancanza di ulteriori informazioni. Il particolare vetro utilizzato nei prototipi presentati nel seguito è stato caratterizzato tramite misure di capacità con un analizzatore di impedenza e misure di parametri di scattering in guida d'onda che hanno permesso di stimare un valore medio pari a 6, leggermente superiore a basse frequenze (meno di 10 MHz).

1.3.3 Procedure di simulazione delle prestazioni ottiche

I produttori di vetri e pellicole generalmente non rivelano in maniera completa le strutture e le proprietà dei loro prodotti. La misura "radiometrica" esterna dei principali parametri di interesse è comunque possibile: molti produttori affidano questo tipo di informazioni all'*Interna-*

tional Glazing Database (IGDB) [7]. Le caratteristiche di trasmittanza e riflettanza ottica e di controllo termico delle pellicole usate per le simulazioni presentate nel seguito sono state estratte dai dati dell'IGDB che raccoglie le informazioni su migliaia di prodotti nel campo delle finestre per edifici. La supervisione tecnica dei dati del database è gestita dal Windows and Daylighting Group del *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)* con il supporto dell'U.S. Department of Energy. Inoltre, i dati provenienti dai produttori europei sono supervisionati dal WinDat Network con il supporto della Commissione Europea. Il database è disponibile on-line ma è protetto e non è modificabile dagli utenti, anche per garantirne l'integrità. Tuttavia le informazioni utili sono accessibili tramite software specifici come Optics. In particolare, il database contiene le misure di trasmittanza e di riflettanza in funzione della lunghezza d'onda λ riferite ad entrambe le facce di quasi tutte le pellicole riportate in tabella 1.1.1. Le misure non sono riferite alla sola pellicola ma ad una configurazione operativa standard, per esempio alla pellicola applicata su un particolare vetro. In modo analogo vengono definiti i parametri ottici e termici globali riportati in tabella 1.1.1. Disaggregando le misure del database è possibile estrarre i parametri di trasmittanza e riflettanza "interni", ovvero non riferiti al sistema aria-pellicola-vetro ma alle singole interfacce formate dalla pellicola con l'aria. Successivamente, ri-assemblando diversamente i vetri e le pellicole è possibile caratterizzare strutture composite come quelle a sandwich che qui si propongono. I dati sono disponibili per quasi tutti i tipi di pellicole considerati, ad eccezione delle famiglie C, D e H ottenute con tecnologie relativamente recenti (in particolare i primi campioni della tipologia H sono stati prodotti nel febbraio 2009). Per avere comunque una stima attendibile si sono considerate pellicole con le caratteristiche più simili. Quindi, in sostituzione della Optima 22 (F8, tipologia D) si è usata la Optima 28, introducendo un fattore correttivo del 6% nella trasmittanza; in sostituzione delle IQue78FG e IQue68P (rispettivamente F15 e F16, tipologia H) si sono usate rispettivamente la V-Kool 75 e la V-Kool 70 che presentano una struttura e una composizione molto simili. Nessuna similitudine è stata trovata per l'Argent 65 e per la IQue53II; tuttavia entrambe sono state utilizzate nelle simulazioni e la Argent 65 è stata impiegata per la realizzazione dei prototipi in quanto offre ottime prestazioni. Gli spettri sono stati approssimati attraverso un modello "a gradino" costituito da due diversi valori costanti nello spettro visibile e IR.

I parametri ottici di una pellicola indipendentemente dal substrato (vetro) si calcolano con le espressioni fornite in Appendice B. I parametri sono inseriti nelle formule utilizzate per simulare strutture contenenti più pellicole e substrati. Per chiarire l'approccio seguito la tabella 1.3.3.1 mostra i risultati delle prime simulazioni effettuate, basate sui film F2 e F5 con le relative strutture: il film F2 è applicato sulla faccia esterna del vetro (Ext) in quanto è caratterizzato da fattore g minore rispetto a quello del film F5 posto sulla faccia interna (Int).

Tabella 1.3.3.1 - Caratteristiche ottiche di tre strutture multistrato simulate.

Codice	Struttura	T_v (%)	g
W1	Ext G6mm F2 F5 Int	16	0.27
W2	Ext F2 G3mm F5 Int	18.3	0.18
W3	Ext F2 G6mm F5 Int	17.9	0.18

La figura 1.3.3.1 mostra la trasmittanza ottica calcolata in funzione della lunghezza d'onda nello spettro del visibile (0.38-0.76 μm) e dell'infrarosso (fino a 2.5 μm). Per fornire un utile confronto tra i valori ottenuti con quelli disponibili in commercio, è interessante notare che le pellicole da edilizia tradizionale offrono valori di trasmittanza ottica nel visibile tra il 15 e il 50%. Recentemente le nanotecnologie hanno consentito di sviluppare pellicole selettive con trasmittanze fino al 70%. Per quanto riguarda le applicazioni automotive (per esempio, finestrini e lunotti di automobili) esistono prodotti con trasmittanze minori del 20%. Si rileva che le strutture a sandwich W2 e W3 raggiungono prestazioni migliori del multistrato W1 che ha i due film F2 e F5 sulla stessa faccia del vetro. Inoltre T_v è leggermente migliore rispetto a quella della pellicola F1 che ha la più elevata SE tra quelle commerciali in tabella 1.1.1. In particolare, la SE di W3 supera quella di F1 di circa 20 dB ma con un fattore solare g ridotto di circa il 10%.

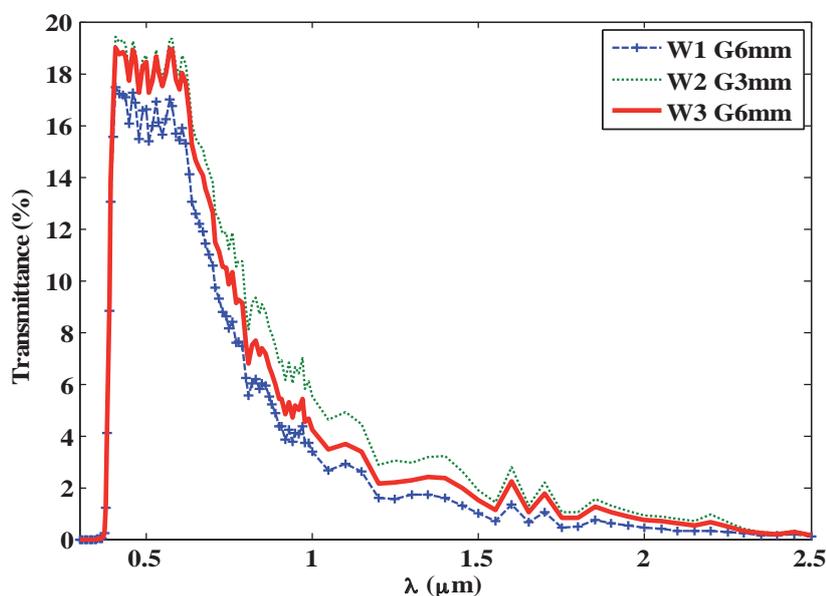


Figura 1.3.3.1 - Spettri di trasmittanza ottica delle strutture descritte in tabella 1.3.

1.4 Prestazioni elettromagnetiche ed ottiche di strutture a sandwich con pellicole commerciali

Le procedure sviluppate sono state utilizzate per il calcolo dell'efficienza di schermatura e delle prestazioni ottiche di numerose strutture a sandwich (multistrato) che utilizzano le pellicole commerciali caratterizzate dai parametri descritti in precedenza.

Per le strutture a sandwich la SE può ritenersi costante dalla continua fino a frequenze per le quali il fenomeno di schermatura è dominato dal coefficiente di riflessione. Questo avviene normalmente per frequenze minori della f^* in (1.8). I minimi locali di SE si trovano sempre a frequenza nulla e a frequenze molto alte (maggiori di 10 GHz). Una approssimazione per tali minimi può essere ottenuta a partire dalle sheet resistance delle singole pellicole:

$$SE_{dB} \cong 45.51 + 20 \log_{10} \left(\frac{1}{R_{sheet1}} + \frac{1}{R_{sheet2}} \right) \quad (1.9)$$

L'andamento esatto della SE dipende dai parametri dei sandwich ed in particolare dallo spessore e dalla permittività del vetro impiegato. A titolo di esempio si riportano alcuni dati per un sandwich con vetro caratterizzato da $\epsilon_r=4$: il massimo non dipende dal tipo di pellicola e si trova a 12.51 GHz per un sandwich di spessore di 3 mm, 6.21 GHz per uno di 6 mm, 11.31 GHz per una pila di 6 mm, 5.81 GHz per un doppio vetro con spessore 3 mm per ogni vetro.

Nelle simulazioni sono stati calcolati i valori medi di SE negli intervalli di frequenza 0-100 MHz (SE_0) e 100 MHz-2 GHz (SE_m). SE_0 rappresenta il valore asintotico dell'efficienza di schermatura per frequenza che tende a zero. Gli spettri di SE e di $T_v(\%)$ sono riportati rispettivamente nelle figure 1.4.1 e 1.4.2. Le tabelle 1.4.1 e 1.4.2 mostrano i risultati delle simulazioni per strutture che utilizzano rispettivamente pellicole dello stesso tipo e di tipo diverso. La riflettanza ottica R_v indicata nelle tabelle è quella verso l'interno (normalmente indicata come "backward").

Le nuove strutture a sandwich sono in grado di raggiungere livelli di SE molto superiori a quelli misurati per le singole pellicole. La figura 1.4.3 rappresenta i dati riportati in figura 1.1.1 e, per confronto, il valore notevolmente più elevato di SE di una struttura a sandwich.

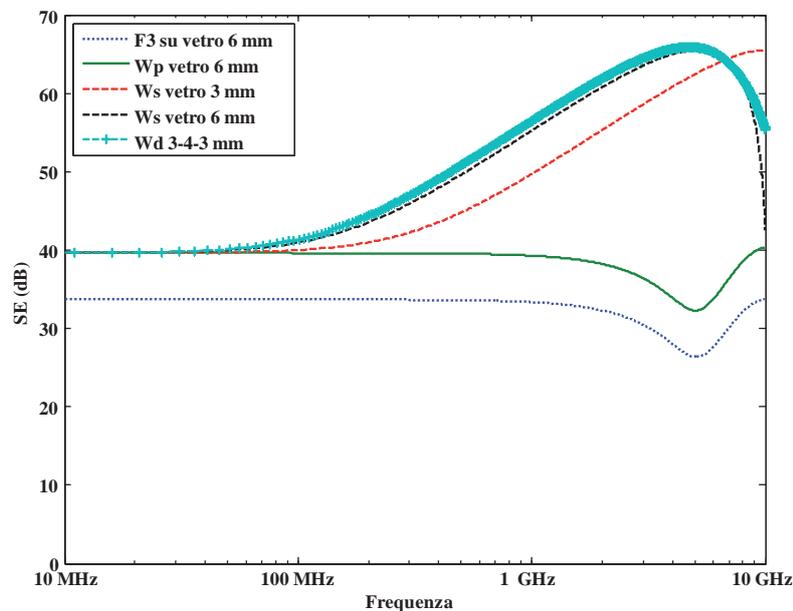


Figura 1.4.1 - Spettri in frequenza di SE per la pellicola Century Nova 50 (F3, tipologia B) applicata su varie strutture.

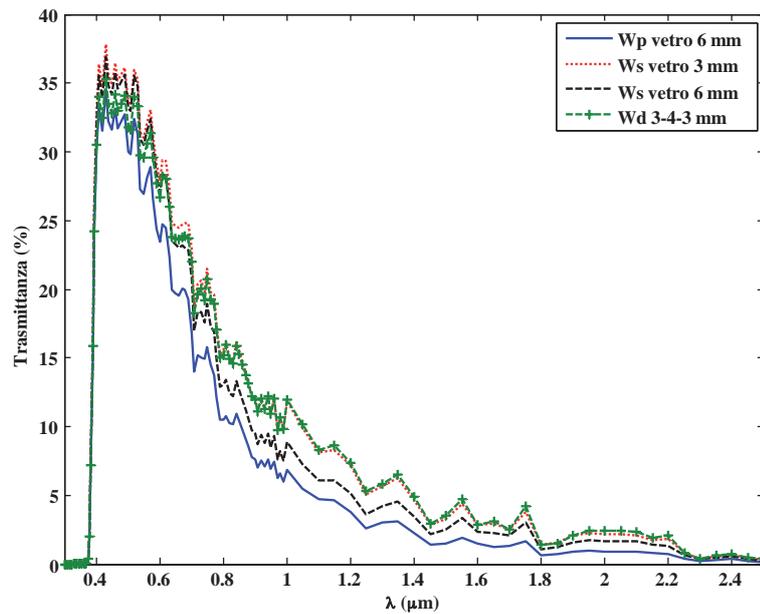


Figura 1.4.2 - Spettri in frequenza di $T_v(\%)$ per la pellicola Century Nova 50 (F3, tipologia B) applicata su varie strutture.

Tabella 1.4.1 - Risultati delle simulazioni elettromagnetiche ed ottiche per strutture che utilizzano coppie di film dello stesso tipo.

Struttura	SE_0	SE_m	$T_v(\%)$	$R_v(\%)$	g
F1+F1					
Wp-G6 F1 F1	41.3	40.83	3.17	36.6	0.17
Ws-F1 G3 F1	41.48	52.23	3.89	36.62	0.14
Ws-F1r G3 F1	41.48	52.23	3.85	36.51	0.14
Ws-F1 G6 F1	41.95	57.43	3.76	36.53	0.14
Wd-G3 F1 V4 G3 F1	42.15	58.64	3.67	36.63	0.15
Wd-G3 F1r V4 G3 F1	42.15	58.64	3.71	36.73	0.15
F2+F2					
Wp-G6 F2 F2	43.08	42.61	10.98	47.42	0.19
Ws-F2 G3 F2	43.35	55.54	15.16	56.44	0.16
Ws-F2r G3 F2	43.35	55.54	15.07	56.27	0.15
Ws-F2 G6 F2	44.01	60.89	14.57	55.97	0.15
Wd-G3 F2 V4 G3 F2	44.27	62.11	14.6	56.73	0.16
Wd-G3 F2r V4 G3 F2	44.27	62.11	14.69	56.91	0.17
F3+F3					
Wp-G6 F3 F3	39.62	39.14	27.74	29.94	0.3
Ws-F3 G3 F3	39.74	49.15	32.13	39.11	0.28
Ws-F3r G3 F3	39.74	49.15	32.1	39.03	0.28
Ws-F3 G6 F3	40.08	54.19	31.22	38.6	0.27
Wd-G3 F3 V4 G3 F3	40.22	55.36	30.51	40.38	0.28
Wd-G3 F3r V4 G3 F3	40.22	55.36	30.53	40.46	0.28

segue **Tabella 1.4.1** - Risultati delle simulazioni elettromagnetiche ed ottiche per strutture che utilizzano coppie di film dello stesso tipo.

Struttura	SE_0	SE_m	$T_v(\%)$	$R_v(\%)$	g
F5+F5					
Wp-G6 F5 F5	30.88	30.41	24.19	17.93	0.31
Ws-F5 G3 F5	30.9	34.55	26.45	19.55	0.31
Ws-F5r G3 F5	30.9	34.55	26.42	19.38	0.31
Ws-F5 G6 F5	30.95	38.13	25.74	19.32	0.3
Wd-G3 F5 V4 G3 F5	30.97	39.07	24.68	20.58	0.3
Wd-G3 F5r V4 G3 F5	30.97	39.07	24.71	20.74	0.3
F7+F7					
Wp-G6 F7 F7	26.41	26.13	46.51	21.51	0.41
Ws-F7 G3 F7	26.42	28.25	51.45	30.36	0.41
Ws-F7r G3 F7	26.42	28.25	51.46	30.40	0.41
Ws-F7 G6 F7	26.44	30.80	50.12	29.84	0.39
Wd-G F7 V4 G3 F7	26.44	31.55	48.43	33.15	0.40
Wd-G3 F7r V4 G3 F7	26.44	31.55	48.42	33.12	0.40

Tabella 1.4.2 - Risultati delle simulazioni elettromagnetiche ed ottiche per strutture che utilizzano coppie di film di tipo diverso.

Struttura	SE_0	SE_m	$T_v(\%)$	$R_v(\%)$	g
F2+F5					
Wp-G6 F2 F5	32.09	31.81	16.00	17.93	0.27
Ws-F2 G3 F5	32.11	35.78	18.47	29.36	0.19
Ws-F2r G3 F5	32.11	35.78	18.44	29.07	0.18
Ws-F2 G6 F5	32.16	39.41	17.94	28.57	0.18
Wd-G3 F2 V4 G3 F5	32.18	40.37	17.68	29.78	0.18
Wd-G3 F2r V4 G3 F5	32.18	40.37	17.70	30.06	0.19
F3+F5					
Wp-G6 F3 F5	36.31	35.83	25.66	17.93	0.31
Ws-F3 G3 F5	36.34	41.88	28.66	23.48	0.28
Ws-F3r G3 F5	36.34	41.88	28.65	23.42	0.28
Ws-F3 G6 F5	36.45	46.13	27.89	23.03	0.27
Wd-G3 F3 V4 G3 F5	36.5	47.19	27.07	24.5	0.27
Wd-G3 F3r V4 G3 F5	36.5	47.19	27.08	24.56	0.27

segue **Tabella 1.4.2** - Risultati delle simulazioni elettromagnetiche ed ottiche per strutture che utilizzano coppie di film di tipo diverso.

Struttura	SE_0	SE_m	$T_v(\%)$	$R_v(\%)$	g
F3+F7					
Wp-G6 F3 F7	36.69	36.22	35.84	21.51	0.35
Ws-F3 G3 F7	36.74	42.92	40.43	35.63	0.33
Ws-F3r G3 F7	36.74	42.92	40.41	35.5	0.33
Ws-F3 G6 F7	36.87	47.34	39.35	34.82	0.31
Wd-G3 F3 V4 G3 F7	36.93	48.42	38.24	37.63	0.32
Wd-G3 F3r V4 G3 F7	36.93	48.42	38.26	37.76	0.32
F5+F7					
Wp-G6 F5 F7	31.6	31.12	33.4	21.51	0.35
Ws-F5 G3 F7	31.62	35.61	36.67	28.23	0.36
Ws-F5r G3 F7	31.62	35.61	36.62	27.91	0.36
Ws-F5 G6 F7	31.67	39.34	35.7	27.83	0.34
Wd-G3 F5 V4 G3 F7	31.7	40.3	34.27	30.23	0.34
Wd-G3 F5r V4 G3 F7	31.7	40.3	34.31	30.54	0.35
F7+F15					
Wp-G6 F7 F15	26.43	26.15	54.28	8.34	0.45
Ws-F7 G3 F15	26.43	28.27	58.55	19.23	0.44
Ws-F7r G3 F15	26.43	28.27	58.56	19.28	0.44
Ws-F7 G6 F15	26.45	30.82	57.13	18.55	0.42
Wd-G3 F7 V4 G3 F15	26.46	31.57	54.67	22.82	0.42
Wd-G3 F7r V4 G3 F15	26.46	31.57	54.66	22.77	0.42

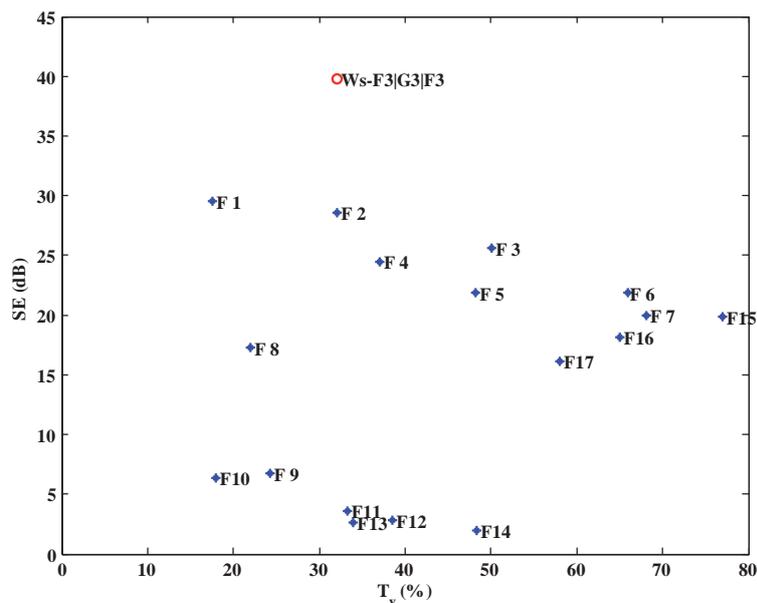


Figura 1.4.3 - Confronto tra i valori di SE e di trasmittanza ottica dei film indicati in fig.1.1 e di una struttura a sandwich (F3/G3/F3).

1.5 Realizzazione e caratterizzazione di campioni a sandwich con pellicole commerciali

L'analisi eseguita mediante simulazione e sperimentazione ha consentito di individuare le strutture multistrato composte da pellicole commerciali su vetro in grado di offrire le migliori prestazioni in termini di efficienza di schermatura, di trasmittanza ottica e di controllo termico.

Si è quindi proceduto alla realizzazione dei seguenti prototipi:

1. pellicola F6 (Argent 65, tipologia C) su vetro di 3 mm, dimensioni complessive 12.8 cm x 12.8 cm x 3 mm;
2. pellicola F7 (Century Nova 70, tipologia B) su vetro di 3 mm, dimensioni 4.4 cm x 4.4 cm x 3 mm;
3. sandwich Ws-F5|G3|F5 di due pellicole F5 (Solar Bronze 50, tipologia A) su vetro di 3 mm, dimensioni 4.4 cm x 4.4 cm x 3 mm;
4. sandwich Ws-F6|G2|F6 di due pellicole F6 (Argent 65, tipologia C) su vetro di 2 mm, dimensioni 12.8 cm x 12.8 cm x 2 mm;
5. sandwich Ws-F6|G3|F6 di due pellicole F6 (Argent 65, tipologia C) su vetro di 3 mm, dimensioni 4.4 cm x 4.4 cm x 3 mm;
6. sandwich Ws-F7|G2|F7 di due pellicole F7 (Century Nova 70, tipologia B) su vetro 2 mm, dimensioni 4.4 cm x 4.4 cm x 3 mm.

La foto di figura 1.5.1 mostra la trasparenza del campione Ws-F6|G2|F6 formato da un sandwich di due pellicole F6 (Argent 65, tipologia C).



Figura 1.5.1 - Foto del campione Ws-F6|G2|F6, corrispondente ad un sandwich di due pellicole F6 (Argent 65, tipologia C).

I campioni realizzati sono stati caratterizzati sperimentalmente in guida d'onda per la misura di efficienza di schermatura e mediante uno spettrofotometro per la misura delle prestazioni ottiche.

Le misure di *SE* in guida d'onda hanno evidenziato difficoltà dovute allo spessore di vetro dei campioni troppo elevato (superiore al millimetro) non rispondente allo standard richiesto

dall'apparecchiatura utilizzata. L'influenza dello spessore del vetro è evidenziato dalla misura, mediante guida coassiale di diametro 4.4 cm, del parametro di scattering S_{21} (trasmissione) di due campioni di vetro di spessore 2 mm e 3 mm. Gli spettri di figura 1.5.2 mostrano la differenza riscontrata tra i due vetri. È evidente la risonanza a circa 4.3 GHz dovuta dello spessore elevato del vetro. I valori a bassa frequenza fino a circa 2 GHz sono sovrastimati a causa del carente accoppiamento capacitivo tra le due flangie della guida d'onda.

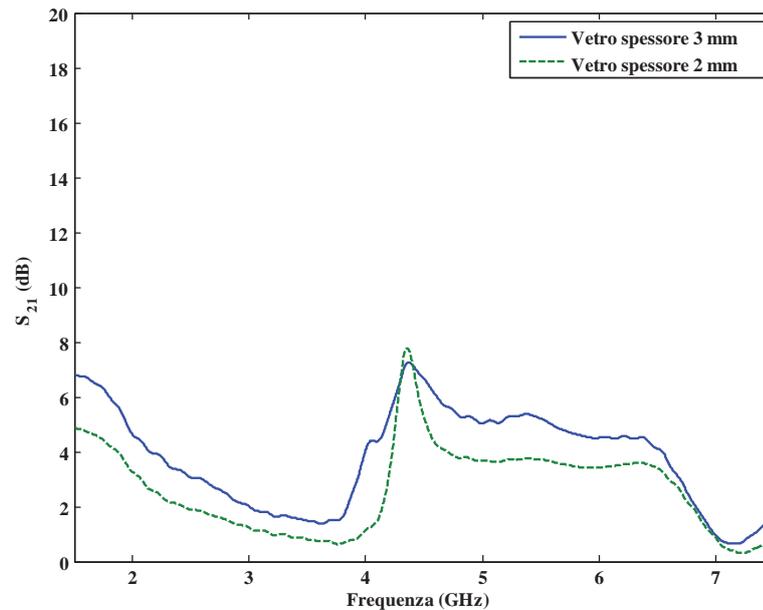


Figura 1.5.2 - Spettri misurati del coefficiente di scattering (trasmissione) su due campioni di vetro di diverso spessore.

Le figure 1.5.3-1.5.8 mostrano gli spettri misurati di efficienza di schermatura di alcuni campioni realizzati. In alcuni casi è riportata in figura la curva di “compenso” del profilo misurato in modo da facilitare il confronto con lo spettro calcolato mediante la procedura descritta in precedenza.

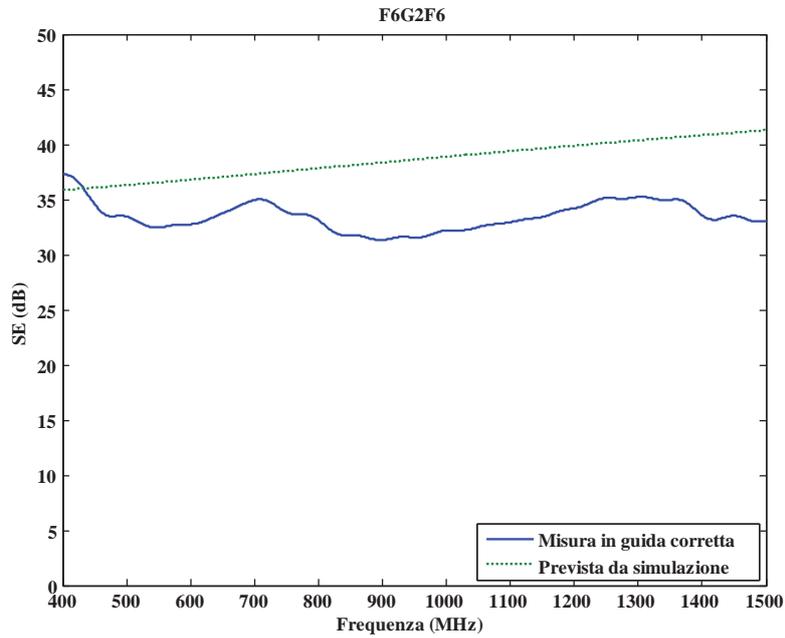


Figura 1.5.3 - Spettro misurato di SE del campione a sandwich composto da due pellicole F6 (Argent 65) su entrambe le facce del vetro di spessore 2 mm (guida coassiale di diametro 12.8 cm).

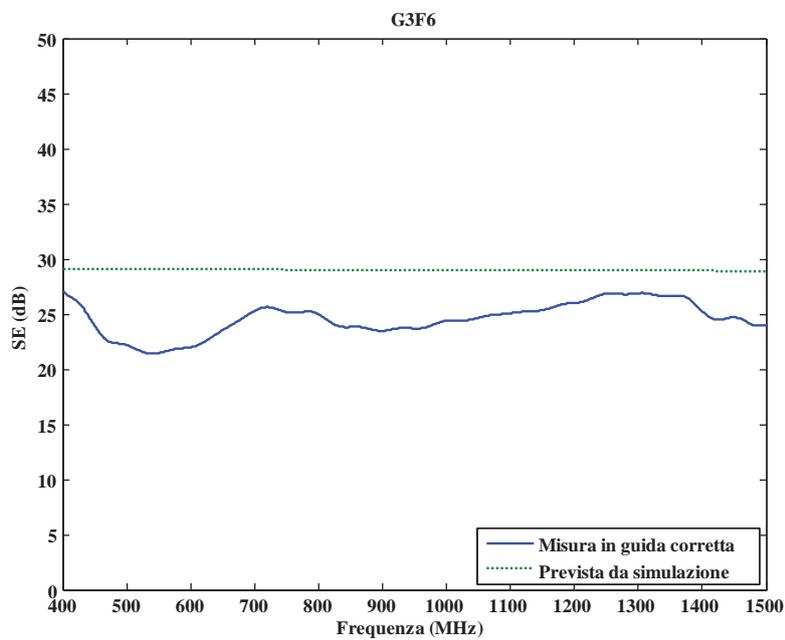


Figura 1.5.4 - Spettro misurato di SE del campione a sandwich composto da una pellicola F6 (Argent 65) sul vetro di spessore 3 mm (guida coassiale di diametro 12.8 cm).

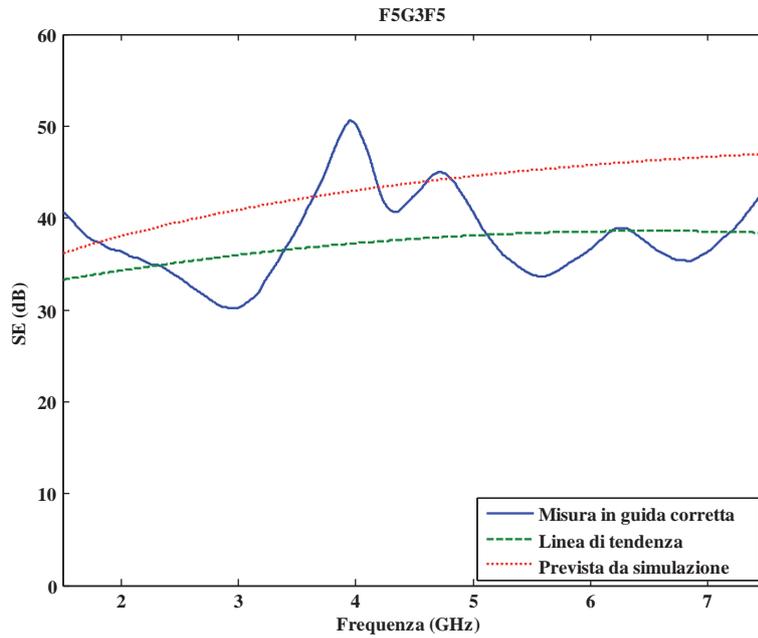


Figura 1.5.5 - Spettro misurato di SE del campione a sandwich composto da due pellicole F5 su entrambe le facce del vetro di spessore 3 mm (guida coassiale di diametro 4.4 cm).

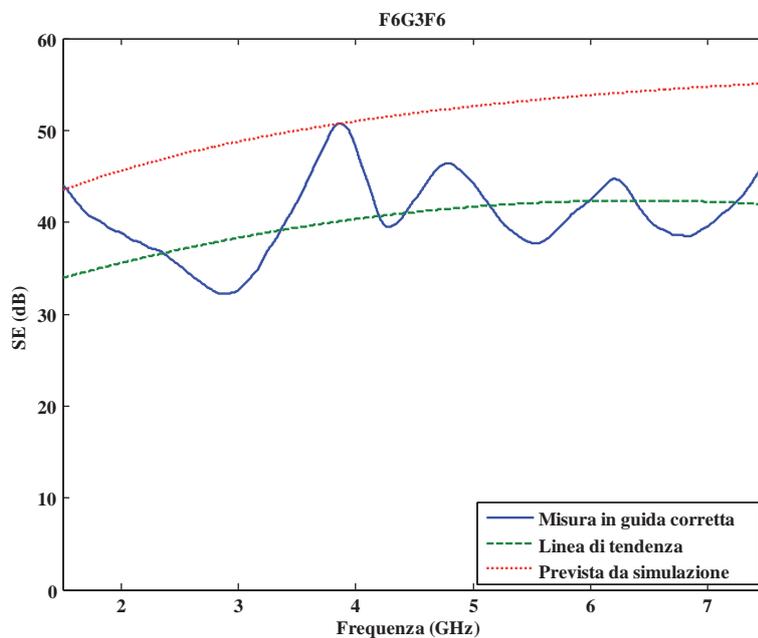


Figura 1.5.6 - Spettro misurato di SE di un campione a sandwich composto da due pellicole F6 su entrambe le facce del vetro di spessore 3 mm (guida coassiale di diametro 4.4 cm).

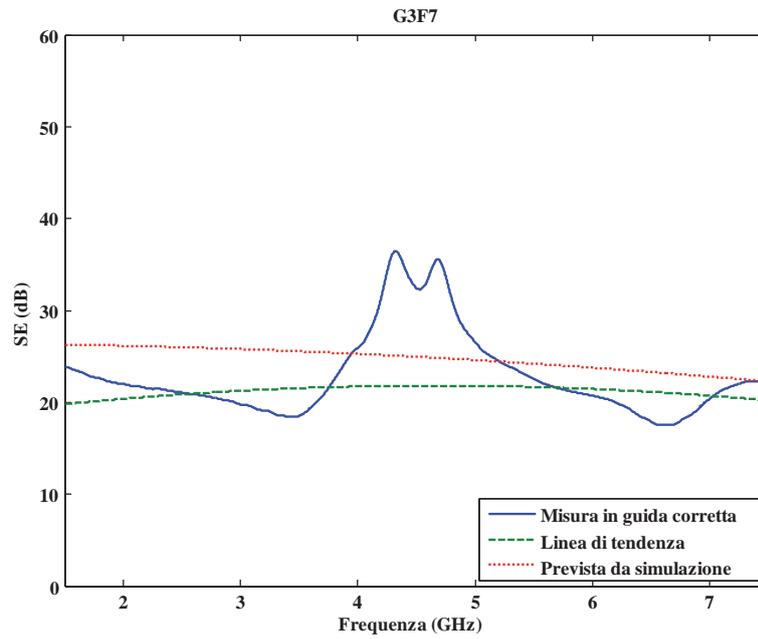


Figura 1.5.7 - Spettro misurato di SE sperimentale di una pellicola F7 sul vetro di spessore 3 mm (guida coassiale di diametro 4.4 cm).

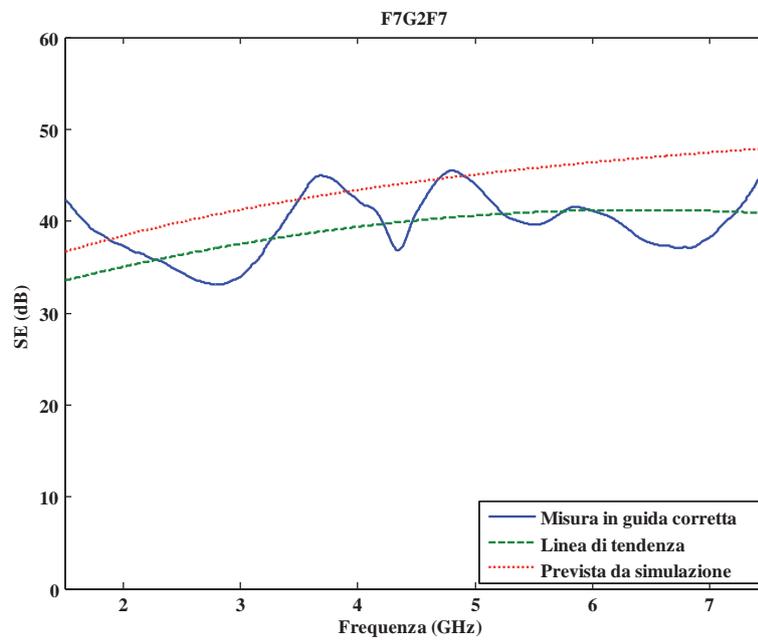


Figura 1.5.8 - Spettro misurato di SE di un campione a sandwich composto da due pellicole F7 su entrambe le facce del vetro di spessore 2 mm (guida coassiale di diametro 4.4 cm).

I campioni realizzati sono stati sottoposti anche a test per la misura della trasmittanza ottica. È opportuno ricordare che i valori ottici e termici riportati nelle specifiche delle pellicole sono riferiti ad installazioni su vetri di riferimento. Quindi si sono dovuti adattare i valori di trasmittanza del vetro di riferimento a quelli dei vetri utilizzati per costruire i prototipi. La figura 1.5.9 riporta gli spettri di trasmittanza ottica misurati su due campioni di vetro di spessore diverso e gli spettri calcolati per un vetro delle stesse caratteristiche di quello usato per definire i parametri della maggior parte delle pellicole.

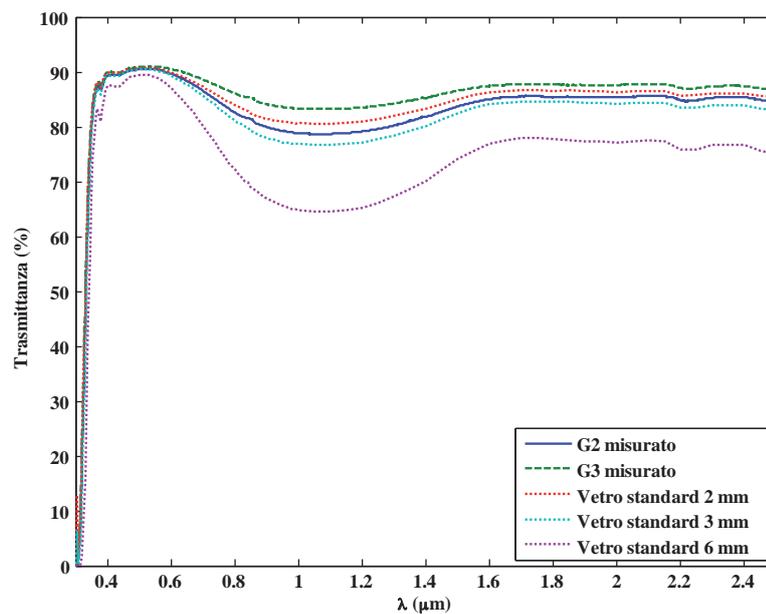


Figura 1.5.9 - Spettri misurati di trasmittanza ottica di due campioni di vetro confrontati con gli spettri calcolati considerando un vetro standard di differente spessore.

La trasmittanza ottica prevista dalla la simulazione è confrontata nelle Figure 1.5.10-1.5.12 con le misure di alcuni campioni realizzati ottenute allo spettrofotometro: i profili ottenuti si dimostrano in buon accordo.

La figura 1.5.13 mostra gli spettri misurati di trasmittanza ottica dei campioni che utilizzano la stessa pellicola F7 in strutture differenti. Ovviamente, le configurazioni a sandwich riducono la trasmittanza rispetto alla struttura pellicola su vetro. Le oscillazioni di T_v (frange di interferenza) sono causate dallo spessore del vetro, mentre l'andamento medio è determinato dalle pellicole.

Infine, si deve notare che le pellicole accrescono la robustezza del vetro ed impediscono la fuoriuscita di schegge in caso di rottura, come è stato verificato a seguito di un urto violento su uno dei campioni presentati. L'effetto protettivo può aumentare utilizzando speciali pellicole disponibili in commercio.

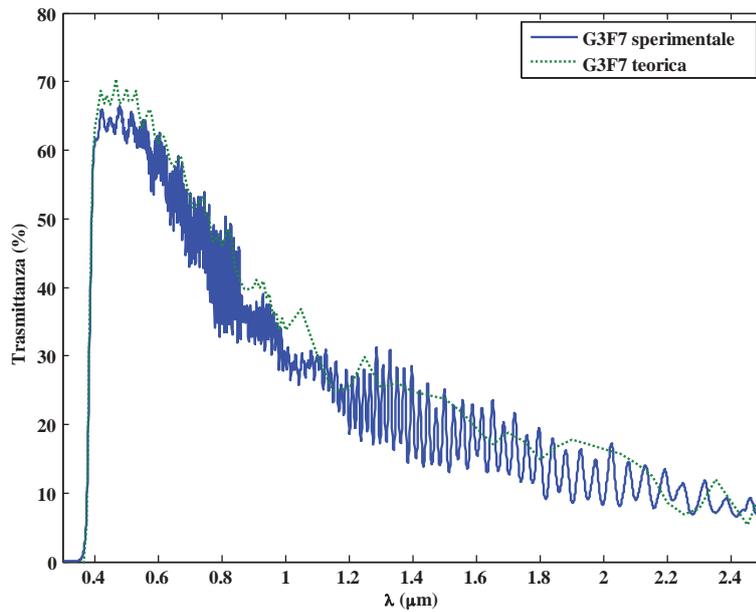


Figura 1.5.10 - Spettri misurati e calcolati di trasmittanza ottica del campione G3F7 (pellicola F7 su vetro di 3 mm).

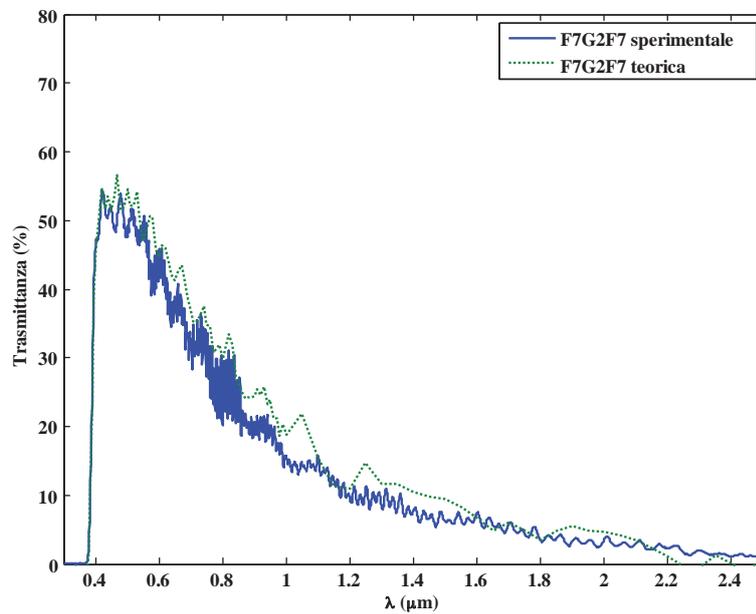


Figura 1.5.11 - Spettri misurati e calcolati di trasmittanza ottica del campione F7G2F7 (pellicola F7 su entrambe le facce del vetro di 3 mm).

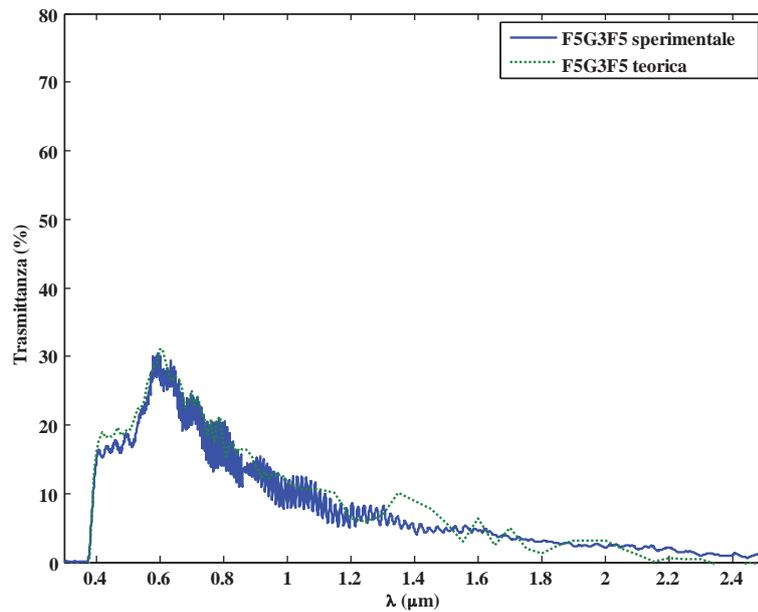


Figura 1.5.12 - Spettri misurati e calcolati di trasmittanza ottica del campione F5G3F5 (pellicola F5 su entrambe le facce del vetro di 3 mm).

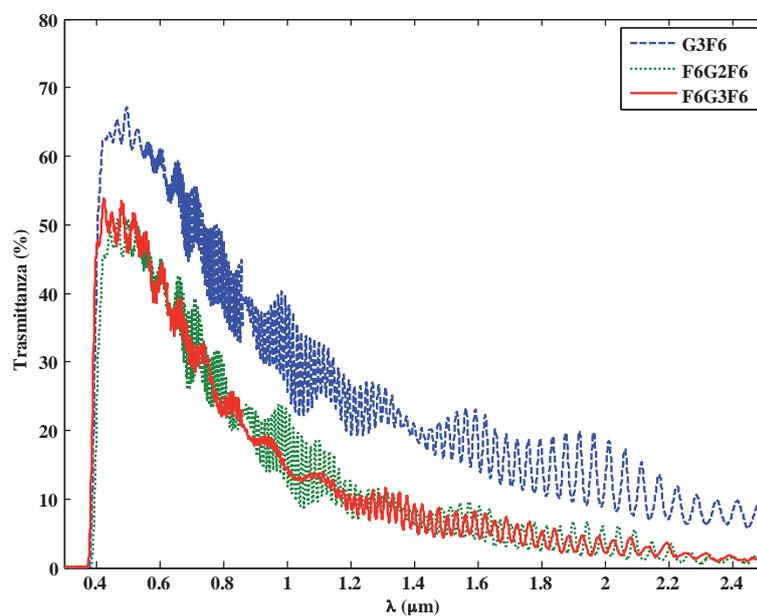


Figura 1.5.13 - Spettri misurati di trasmittanza ottica di campioni che utilizzano la pellicola Argent 65 (F6, tipologia C).

2 Progetto e fattibilità di campioni di schermi elettromagnetici trasparenti nanostrutturati

2.1 Caratteristiche dei metalli trasparenti

Rivestimenti sottili, multistrato, conduttivi contenenti metallo sono stati oggetto di approfondite indagini per le caratteristiche di trasparenza alle frequenze ottiche e di bassa emissività in vetri termici. Tali rivestimenti su vetro hanno *sheet resistance* inferiore a qualche ohm per square e trasmittanza nel visibile fino al 70%. Sono anche stati utilizzati per protezione contro interferenze elettromagnetiche a radio frequenza, anche se non sono stati analizzati e caratterizzati in maniera sistematica. La prestazione di schermatura è limitata dal valore della *sheet resistance*, che a sua volta dipende dallo spessore e dalla conducibilità del metallo. Tuttavia a causa dell'elevato assorbimento del metallo aumentando lo spessore del metallo diminuisce la trasmittanza ottica.

È stato dimostrato che sostituendo un singolo strato di metallo con una particolare struttura multistrato metallo-dielettrico, contenente lo stesso spessore di metallo, la trasmittanza complessiva nel visibile può aumentare. Tali strutture sono note come “metalli trasparenti”. Le loro proprietà trasmissive sono state studiate in modo estensivo mediante la teoria del *photonic band gap* (PBG). In generale le strutture dielettriche PBG monodimensionali (1D) sono costituite da strati adiacenti alterni di due materiali dielettrici caratterizzati da alto e basso valore di indice di rifrazione. I due strati adiacenti formano una cella, che viene ripetuta un numero di volte in modo da produrre una struttura periodica. Se lo spessore dello strato è paragonabile alla lunghezza d'onda associata al campo elettromagnetico che si propaga nel mezzo, si manifestano interferenze costruttive o distruttive con conseguente trasmissione o riflessione di luce. L'interferenza distruttiva fa aumentare i gap nello spettro della luce trasmessa. Fuori dal gap, nelle bande passanti, gli effetti di interferenza danno luogo a risonanze del tipo Fabry-Perot; la trasmittanza può raggiungere il 100% in assenza di assorbimento lineare o perdite spurie. Le proprietà trasmissive di strutture 1D-PBG metallo-dielettrico (MD), fatte di argento (Ag) e fluoruro di magnesio (MgF_2) sono state analizzate in passato per via sperimentale e teorica.

Il gruppo di ricerca del CNIS della Sapienza ha condotto approfondite ricerche per il progetto e la realizzazione di strutture 1D-PBG da utilizzare come schermi elettromagnetici a radio frequenza, trasparenti alle frequenze ottiche. Sono state realizzate strutture metallo-semiconduttore (MS) 1D-PBG fatte di Ag e ossido di zinco (ZnO) per schermi elettromagnetici a radio frequenza con elevata trasmittanza nel visibile: *SE* superiore a 35 dB per frequenze fino a 18 GHz. Gli studi successivamente condotti hanno dimostrato che schermi con *SE* di 40 dB e trasmittanza nel visibile del 70% sono ottenibili mediante strutture MD-PBG a base di argento e biossido di titanio.

2.2 Requisiti di progetto

Si considera un metallo trasparente costituito da una sequenza periodica di strati metallici e dielettrici. Si utilizza argento (Ag) e biossido di titanio (TiO_2). L'argento è scelto in quanto la posizione di risonanza del suo plasma, a circa 320 nm, lo rende adatto per trasmissione ottica nel visibile più di altri metalli come alluminio o oro a rame. Il biossido di titanio è scelto per l'elevato indice di rifrazione al fine di massimizzare la trasmittanza ottica del film multistrato.

2.2.1 Efficienza di schermatura elettromagnetica

La struttura deve fornire SE maggiore di 40 dB a radio frequenza, cioè da 30 MHz a 6 GHz. Nel caso di film sottili con spessore molto minore della profondità di penetrazione il fenomeno di schermatura è dominato dal meccanismo di riflessione all'interfaccia aria metallo. Inoltre, è dimostrato che la matrice di trasmissione di un rivestimento a strati nanometrici fatto di strati alternati di metallo e dielettrico può essere approssimato mediante una matrice di un film singolo equivalente di metallo, il cui spessore è dato dalla somma degli spessori degli strati metallici presenti nella struttura. Secondo quanto descritto nel precedente Rapporto la SE per frequenza che approssima lo zero ha la seguente espressione:

$$SE_0 = k + 20 \log d_{Ag} \sigma_{Ag} \quad (2.1)$$

in cui d_{Ag} e σ_{Ag} sono rispettivamente lo spessore e la conducibilità dell'argento, k assume il valore di 45.51 dB. Assumendo σ_{Ag} per l'argento uguale a 7.75×10^6 S/m d_{Ag} deve essere uguale a 68 nm.

2.2.2 Trasmittanza ottica

Il metallo trasparente è progettato per avere massima trasmittanza ottica $T(0, \lambda_c)$, più alta del 70% per incidenza normale ($\theta = 0$) alla lunghezza d'onda centrale nel range visibile ($\lambda_c = 550$ nm). La curva di responsivity dell'occhio umano, riportata in figura 2.1, è data dalla seguente espressione:

$$r(\lambda) = \exp \left[-2(\lambda - \lambda_0)^2 / W^2 \right] \quad (2.2)$$

in cui $\lambda_{\min} = 400$ nm, $\lambda_{\max} = 700$ nm, $\lambda_0 = 555$ nm, $W = 83$ nm. Si richiede quindi che la trasmittanza media per incidenza normale pesata dalla curva di responsivity dell'occhio umano, definita da:

$$T_{av}(0) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} T(\lambda; 0) r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} r(\lambda) d\lambda} \quad (2.3)$$

sia più alta del 60%. Il rivestimento dovrebbe essere caratterizzato da trasparenza isotropica nel range visibile. Dunque, è richiesto che la trasmittanza media normalizzata per incidenza obliqua a $\lambda_c = 550$ nm, definita da:

$$T_{obl}(\lambda_c) = \frac{2}{\pi T(\lambda_c; 0)} \int_0^{\pi/2} T(\lambda_c; \theta) d\theta, \quad (2.4)$$

sia più grande di 0.9 e più piccolo di 1.1. Si deve rilevare che in generale valori di T_{obl} minori di uno caratterizzano metalli trasparenti con trasmittanza massima a 550 nm per incidenza normale, mentre valori di T_{obl} più grandi di uno sono tipici di rivestimenti con trasmittanza mas-

sima a 550 nm per incidenza obliqua. Dunque le prime strutture *PBG* sono ottimizzate come filtri ottici nel visibile, mentre la regione passa banda delle ultime non è centrata a 550 nm.

La prestazione ottica del *PBG* può essere valutata anche usando il fattore di qualità di trasmissione Q_T pesato dalla curva di responsivity dell'occhio umano definita da:

$$Q_T = \frac{\int_0^{\pi/2} d\theta \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} T(\lambda; \theta) r(\lambda) d\lambda}{\frac{\pi}{2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} r(\lambda) d\lambda} \quad (2.5)$$

che consente di quantificare la prestazione ottica del rivestimento in funzione della frequenza e dell'angolo di incidenza.

La scelta ottima di d_1 e d_2 corrisponde al massimo di Q_T . Tuttavia, si noti che l'uso della sola Q_T come figura di merito nel procedura di progetto non consente di distinguere a priori tra rivestimenti con regione passa banda centrata nel range del visibile ($T_{obl} < 1$), o no ($T_{obl} > 1$).

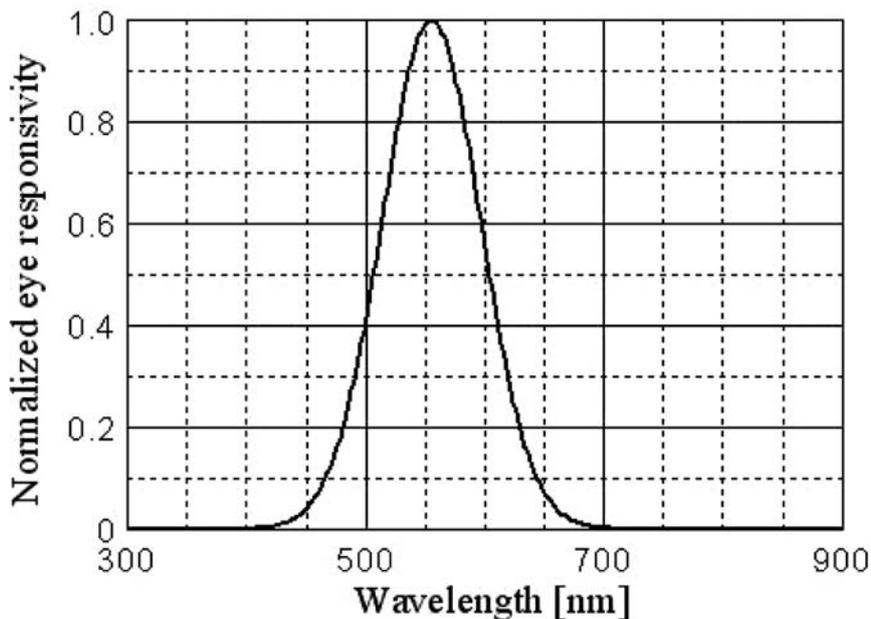


Figura 2.3.1.1 - Sensitività dell'occhio umano in funzione della lunghezza d'onda.

Il terzo vincolo da considerare nel progetto è che lo strato esterno del rivestimento di schermatura non deve essere conduttivo in modo da minimizzare riflessioni nel range del visibile, e allo stesso tempo gli strati interni di argento dovrebbero essere messi a massa per consentire la circolazione delle correnti indotte dal campo incidente, che sono responsabili del meccanismo di schermatura.

Infine, si deve considerare che lo spessore minimo degli strati di argento deve essere maggiore 10 nm, poiché per valori minori la conducibilità dell'argento diminuisce drasticamente.

2.3 Progetto ottimo di uno schermo trasparente nanostrutturato

2.3.1 Prestazioni elettromagnetiche

Si può ritenere che a radio frequenza, fino ad alcuni gigahertz, la struttura multistrato si comporta come se fosse a strato singolo con spessore del metallo, ad esempio Ag, pari alla somma degli spessori degli strati fatti dello stesso metallo.

Si deve osservare che in pratica, ad esempio nel caso di schermi con dimensioni finite lungo gli assi y e z , l'espressione della SE è ancora valida se gli spessori sono molto minori della lunghezza d'onda. Inoltre ciascuno strato conduttivo della struttura può essere collegato a massa in modo che le correnti indotte dal campo incidente, possano circolare.

Tuttavia strutture reali PBG sono generalmente depositate su un substrato in vetro o materiale polimerico, che non è conduttivo. Ciò implica che lo strato esterno, come anche quelli interni, è isolato elettricamente. In pratica, solo il primo strato della struttura è accessibile e può essere messo a massa con contatto diretto. Dunque nel progetto del PBG il vincolo che lo strato metallico sia esterno dovrebbe essere considerato per assicurare l'ottima messa a massa dello schermo.

Le correnti indotte dal campo incidente negli strati interni conduttivi e nell'ennesimo strato possono circolare grazie all'accoppiamento resistivo-capacitivo offerto dal dielettrico o dagli strati semiconduttivi. Alle basse frequenze l'accoppiamento resistivo è dominante, mentre ad alta frequenza è prevalente l'accoppiamento capacitivo.

2.3.2 Prestazioni ottiche

La figura 2.3.2.1 mostra la struttura simmetrica pseudo periodica di un cristallo 1D-fotonico metallo-dielettrico che soddisfa i requisiti descritti in precedenza. Lo spessore totale degli strati d'argento è uguale a 68 nm.

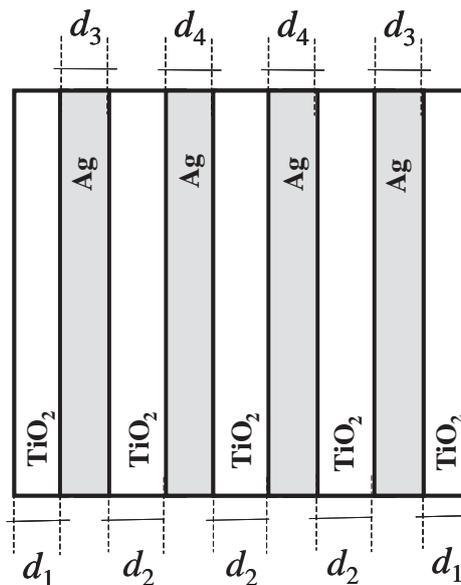
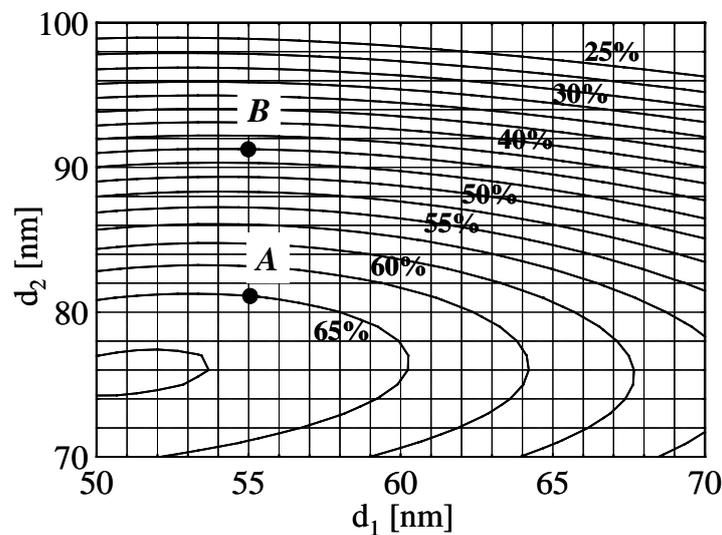


Figura 2.3.2.1 - Configurazione schematica di un metallo trasparente.

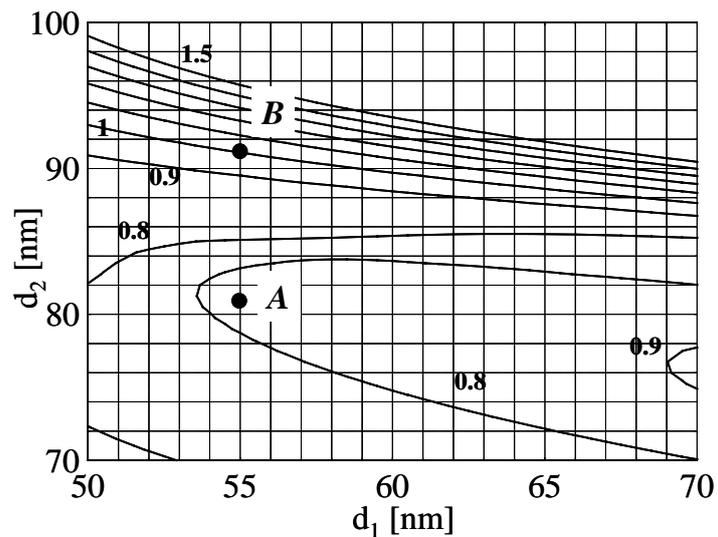
In generale si osserva che l'ampiezza della regione passa banda del filtro dipende dallo spessore dello strato di Ag, mentre la sua posizione nel range ottico è controllata dallo spessore dello strato di TiO₂.

Si considerano due differenti distribuzioni della quantità totale di Ag: $d_3=12$ nm e $d_4=22$ nm, e $d_3=d_4=17$ nm. Gli spessori d_1 e d_2 degli strati interni ed esterni di TiO₂ risultano dalla ottimizzazione delle proprietà ottiche del rivestimento. A tale scopo, si eseguono calcoli numerici per valutare la sensibilità di (0) in (2) e (λ_c) in (3) in funzione di d_1 and d_2 . L'indice di rifrazione per TiO₂ è ottenuto dalle misure, mentre quello di Ag è dato da [11].

Le figure 2.3.2.2(a) e 2.3.2.2(b) mostrano il contour plot di (0) e $T_{obl}(\lambda_c)$ rispettivamente, per il metallo trasparente con $d_3=12$ nm e $d_4=22$ nm in funzione dello spessore dello strato esterno e di quello interno di TiO₂.



(a)

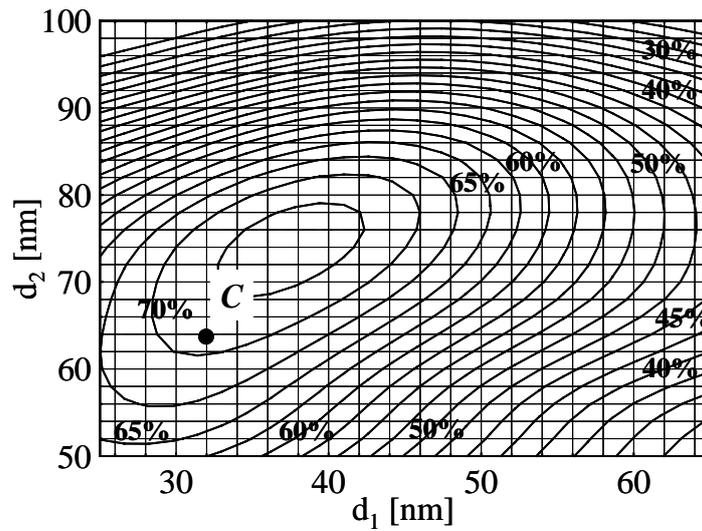


(b)

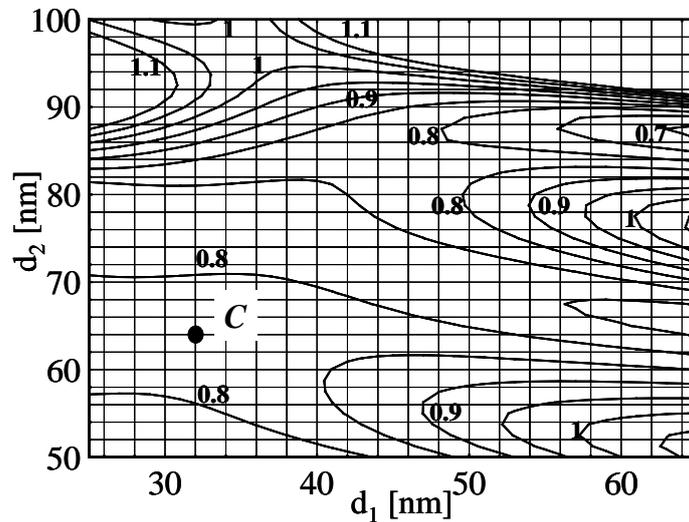
Figura 2.3.2.2 - Contour plots di $T_{av}(0)$ (a) e $T_{obl}(\lambda_c)$ (b) per metallo trasparente con $d_3=12$ nm e $d_4=22$ nm, in funzione dello spessore d_1 e d_2 di TiO₂.

Si noti che per $50 \text{ nm} \leq d_1 \leq 60 \text{ nm}$ e $70 \text{ nm} \leq d_2 \leq 82 \text{ nm}$ $T_{av}(0)$ è sempre maggiore del 60 %, mentre il valore ottimo di $T_{obl}(\lambda_c)$ tra 0.9 e 1.1 può essere raggiunto per $50 \text{ nm} \leq d_1 \leq 70 \text{ nm}$ e $88 \text{ nm} \leq d_2 \leq 92 \text{ nm}$. Gli specifici valori di d_1 e d_2 da usare nella struttura PBG risultano dal compromesso tra la trasmittanza media massima nel visibile e l'elevata isotropia.

Per quanto riguarda il rivestimento con $d_3=d_4=17 \text{ nm}$, i contour plot di $T_{av}(0)$ e (λ_c) sono riportati nelle figure 2.3.2.3 (a) e (b).



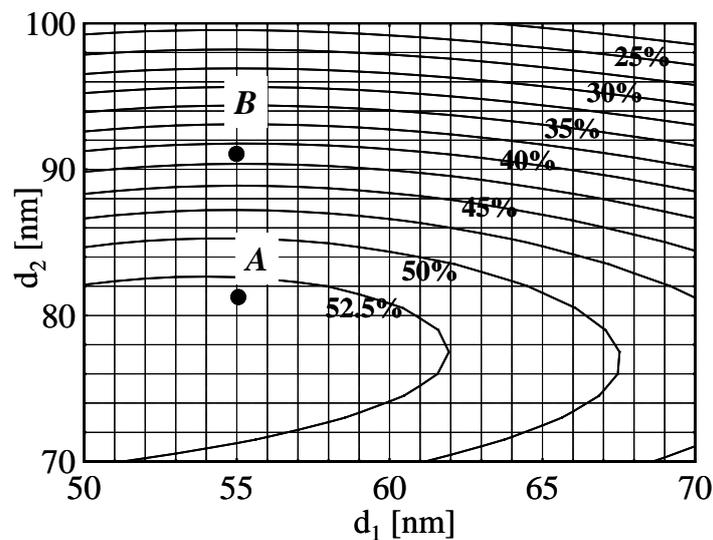
(a)



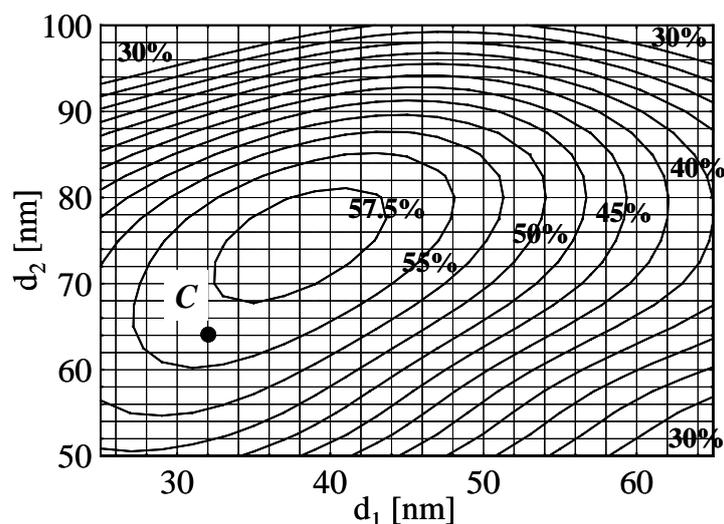
(b)

Figura 2.3.2.3 - Contour plots di $T_{av}(0)$ (a) e $T_{obl}(\lambda_c)$ (b) per il metallo trasparente con $d_3=d_4=17 \text{ nm}$ in funzione degli spessori d_1 and d_2 di TiO_2 .

Si osservi che il massimo di $T_{av}(0)$ in questo caso raggiunge circa il 75%, mentre per rivestimenti con $d_3=12$ nm e $d_4=22$ nm è limitato al 68%. Questo conferma che metalli trasparenti con strati di Ag di maggiore spessore sono caratterizzati da banda passante più stretta. Risulta che $T_{av}(0)$ è sempre più grande del 60% per 30 nm $\leq d_1 \leq 44$ nm e 60 nm $\leq d_2 \leq 84$ nm. $T_{obl}(\lambda_c)$ assume valori ottimi tra 0.9 e 1.1 per 30 nm $\leq d_1 \leq 40$ nm e 86 nm $\leq d_2 \leq 100$ nm, o 50 nm $\leq d_1 \leq 65$ nm e 50 nm $\leq d_2 \leq 58$ nm. I contour plots del fattore di qualità Q_T in funzione di d_1 e d_2 , per rivestimenti con $d_3=12$ nm e $d_4=22$ nm, e con $d_3=d_4=17$ nm sono rappresentati nelle figure 2.3.2.4 (a) e (b), rispettivamente.



(a)



(b)

Figura 2.3.2.4 - Contour plots di Q_T per metalli trasparenti con $d_3=12$ nm, $d_4=22$ nm (a) e con $d_3=d_4=17$ nm, in funzione degli spessori d_1 e d_2 di TiO_2 .

A titolo di esempio sono analizzate le prestazioni ottiche dei tre rivestimenti descritti in tabella 2.3.21. I metalli trasparenti A e B sono a banda stretta con $d_1=55$ nm, e quindi soddisfano requisiti per ottimo $T_{av}(0)$ e $T_{obl}(\lambda_c)$; d_2 è assunto uguale a 81 nm per il campione A, allo scopo di ottimizzare la trasmissione nel range del visibile per incidenza normale, mentre per il campione B d_2 è posto uguale a 91 nm per ottimizzare la multidirezionalità a 550 nm. Infine, il rivestimento C è caratterizzato da ampia banda passante, $T_{av}(0) \approx 71\%$ e $T_{obl}(\lambda_c) \approx 0.8$.

Tabella 2.3.2.1 - Spessori degli strati di TiO_2 e di Ag dei campioni di metallo trasparente aventi le configurazioni di figura 2.2.

Transparent Metal	d_1 [nm]	d_2 [nm]	d_3 [nm]	d_4 [nm]
A	55	81	12	22
B	62	91	12	22
C	32	64	17	17

La figura 2.3.2.5 mostra lo spettro di trasmittanza calcolato per incidenza normale nel range 300 nm-900 nm. Il valore di picco stimato per i campioni A e B raggiunge l'80%, mentre la trasmittanza massima per incidenza normale del campione C è circa 77%. Risulta anche che gli spettri di trasmittanza di A e B sono molto più stretti di quello di C, che mostra migliore neutralità cromatica. Lo spettro di B è molto simile a quello di A, ma è spostato verso il rosso di circa 50 nm.

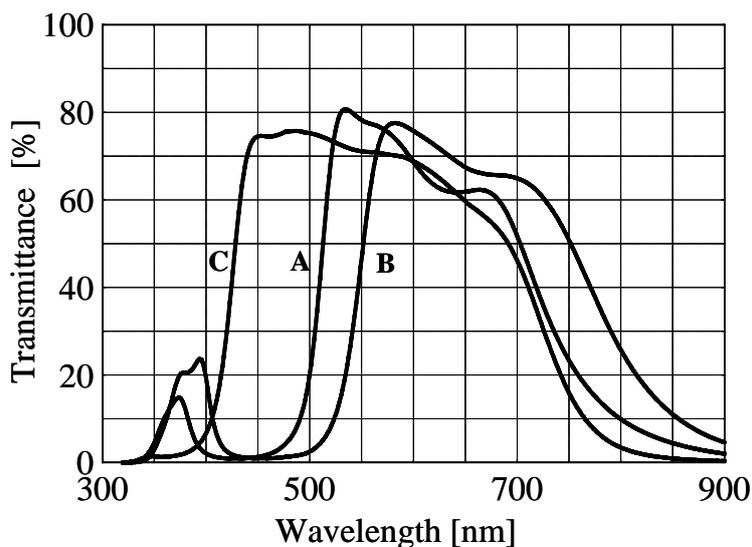


Figura 2.3.2.5 - Spettri di trasmittanza dei metalli trasparenti A,B,C di tabella I per incidenza normale, nel range 300 nm – 900 nm.

La figura 2.3.2.6 mostra l'andamento di T a 550 nm in funzione dell'angolo di incidenza per i tre metalli trasparenti di tabella 2.3.2.1. Si noti che i campioni A e C sono caratterizzati da valori di T quasi costanti per $\theta < 40^\circ$, con il massimo per incidenza normale. Al contrario, per il campione B il massimo di T a 550 nm si manifesta a circa 42° , mentre per incidenza normale risulta $T=46\%$. Questo conferma che le proprietà di trasmittanza di B non sono ottimizzate nel range del visibile e che la risoluzione cromatica non è neutra.

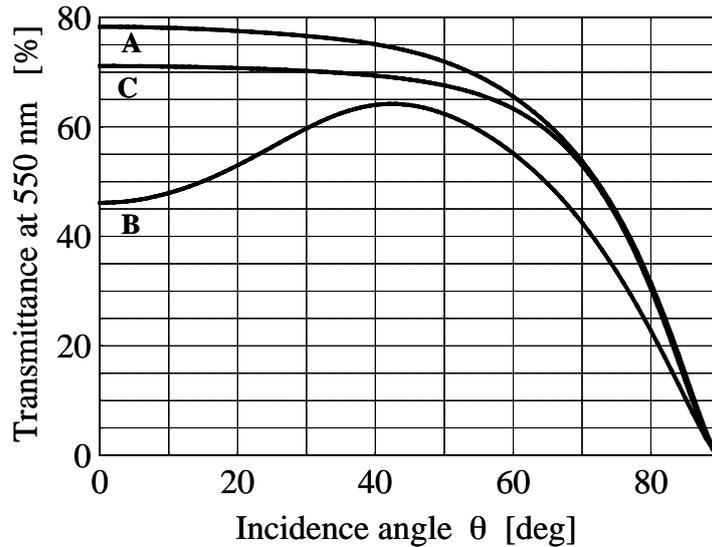


Figura 2.3.2.6 - Spettri di trasmittanza dei campioni A,B,C di tabella 2.1 a 550 nm in funzione dell'angolo di incidenza.

Infine, si analizza l'influenza su T dello strato di titanio (Ti) inserito tra i film di Ag e di TiO_2 . Infatti test sperimentali hanno dimostrato che stacks Ag – TiO_2 non sono stabili dal punto di vista chimico a causa della diffusione di ossigeno nell'argento. Gli strati di titanio avendo spessore di circa 1 nm prevengono l'ossidazione dell'argento. Le figure 2.3.2.7(a) e 2.3.2.7(b) mostrano $T_{av}(0)$ e $T_{obl}(\lambda_c)$ in funzione dello spessore dello strato di titanio per i tre campioni di tabella 2.3.2.1. Risulta che il campione C ha la migliore prestazione per incidenza normale all'aumentare d_{Ti} , mentre il campione B, per $d_{Ti} \leq 1.3$ nm, è il solo che soddisfa il requisito sulla isotropia, cioè $0.9 \leq T_{obl}(\lambda_c) \leq 1.1$.

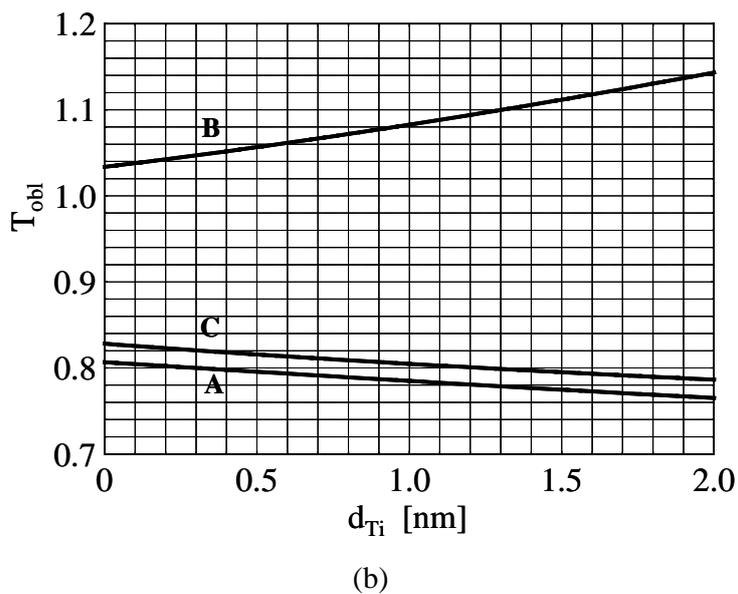
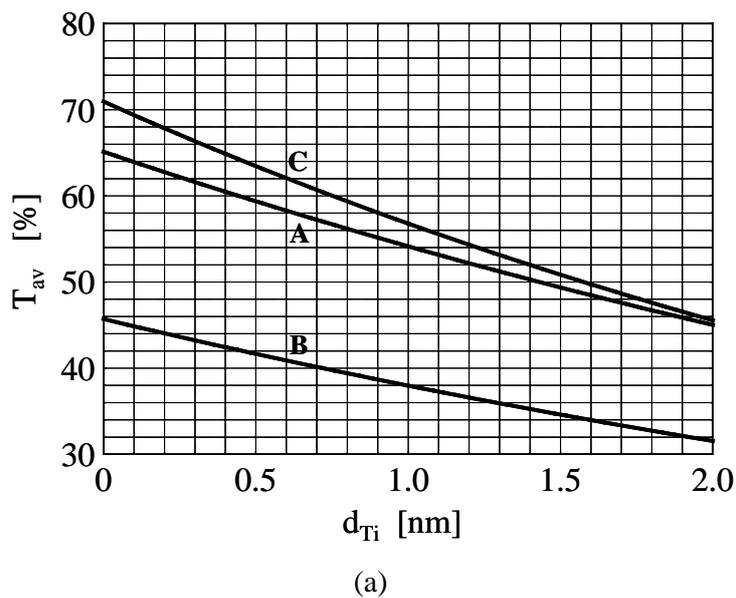


Figura 2.3.2.7 - T_{av} per incidenza normale (a) e T_{obl} a 550 nm (b) dei metalli trasparenti A,B,C di tabella 2.1 in funzione dello spessore dello strato di titanio.

2.3.3 Codici di simulazione

È stato sviluppato un codice di calcolo in linguaggio Matlab per il calcolo dell'efficienza di schermatura di schermi piani realizzati da *PBG* depositati su substrato in materiale vetroso o plastico. Il codice può essere applicato anche alla simulazione di pannelli schermanti con struttura a sandwich.

main_SE_multi.m

Scopo

Il programma calcola l'efficienza di schermatura di uno schermo piano multistrato illuminato da onda piana con angolo di incidenza normale. Lo schermo multistrato può essere di tipologia diversa; ad esempio può essere costituito da:

- substrato rivestito con film sottile multistrato di tipo *MD-PBG* su una o entrambe le facce;
- substrato rivestito con film sottile trasparente a singolo strato (ad esempio ITO) su una o entrambe le facce;
- struttura a sandwich (tipo vetrocamera) con rivestimento a film sottile schermante, applicato su una o più facce.

Ciascuno strato che costituisce lo schermo è modellizzato mediante la definizione dei seguenti parametri elettrici e geometrici:

- conducibilità elettrica espressa in Siemens;
- permittività dielettrica relativa (1 nel caso di metallo);
- spessore espresso in metri.

Si assume che la struttura sia amagnetica, per cui la permeabilità magnetica relativa di ciascuno strato è ipotizzata di valore unitario.

Il programma calcola lo spettro in frequenza dell'efficienza di schermatura.

Dati di input del codice:

NL : number of layers

Per ogni strato *i*-esimo:

d(i) : spessore dello strato *i*
sigma(i) : conducibilità elettrica dello strato *i*
epsr(i) : permittività dielettrica relative dello strato *i*

Schema a blocchi del codice di calcolo:

DEFINIZIONE DEI DATI DI INGRESSO

- Definizione del range di frequenza e no. di step in frequenza
- Definizione dello spessore di ciascun strato
- Definizione della conducibilità elettrica di ciascun strato
- Definizione della permittività dielettrica relativa di ciascun strato



CALCOLO

- Calcolo dei parametri caratteristici di ogni strato

Characteristic impedance	Propagation constant
$\eta = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + \sigma/j\omega}}$	$\gamma = \sqrt{Z'Y'} = j\omega\sqrt{\mu(\epsilon + \sigma/j\omega)}$

- Calcolo della matrice di trasferimento diretta di ogni strato

$$[\Phi_i] = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

with:

$$\Phi_{11} = \Phi_{22} = \cosh(\gamma d) \quad (2a)$$

$$\Phi_{12} = \eta \sinh(\gamma d) \quad (2b)$$

$$\Phi_{21} = \frac{1}{\eta} \sinh(\gamma d) \quad (2c)$$

- Calcolo della matrice di trasferimento diretta dello schermo multistrato:

$$[\Phi_{tot}] = \prod_{i=1}^N [\Phi_i] \quad (3)$$

- Calcolo dell'efficienza di schermatura

$$SE = 20 \log \left(\frac{\Phi_{11} + \Phi_{22} + \eta_0 \Phi_{12} + \eta_0^{-1} \Phi_{21}}{2} \right) \quad (4)$$


GENERAZIONE SPETTRO IN FREQUENZA DI SE

Esempio di applicazione:

Si considera lo schermo multistrato rappresentato in figura 2.3.3.1.

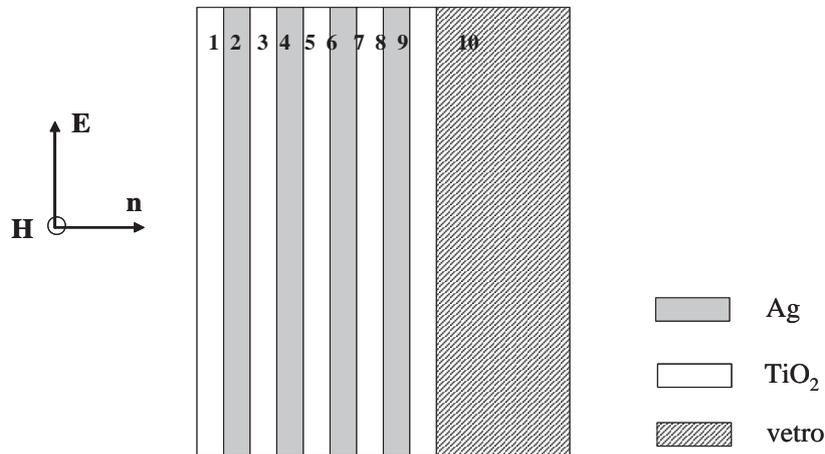


Figura 2.3.3.1 - Configurazione schematica della sezione di uno schermo multistrato.

Dati di ingresso:

L'operatore inserisce I dati di seguito riportati:

Definizione dei parametri e dei dati di ingresso

```
% spessori strati
d(1) = 32e-9; %strato 1 TiO2
d(2) = 17e-9; %strato 2 Ag
d(3) = 64e-9; %strato 3 TiO2
d(4) = 17e-9; %strato 4 Ag
d(5) = 64e-9; %strato 5 TiO2
d(6) = 17e-9; %strato 6 Ag
d(7) = 64e-9; %strato 7 TiO2
d(8) = 17e-9; %strato 8 Ag
d(9) = 32e-9; %strato 9 TiO2
d(10)= 3e-3; %strato 10 vetro
```

```
% conducibilità elettrica strati
sigma(1) = 1e-12; %strato 1 TiO2
sigma(2) = 7.75e6; %strato 2 Ag
sigma(3) = 1e-12; %strato 3 TiO2
sigma(4) = 7.75e6; %strato 4 Ag
sigma(5) = 1e-12; %strato 5 TiO2
sigma(6) = 7.75e6; %strato 6 Ag
sigma(7) = 1e-12; %strato 7 TiO2
```

```

sigma(8) = 7.75e6;%strato 8 Ag
sigma(9) = 1e-12;%strato 9 TiO2
sigma(10)= 1e-12;%strato 10 vetro

% permittività dielettrica relativa strati
epsr(1) = 70;%strato 1 TiO2
epsr(2) = 1;%strato 2 Ag
epsr(3) = 70;%strato 3 TiO2
epsr(4) = 1;%strato 4 Ag
epsr(5) = 70;%strato 5 TiO2
epsr(6) = 1;%strato 6 Ag
epsr(7) = 70;%strato 7 TiO2
epsr(8) = 1;%strato 8 Ag
epsr(9) = 70;%strato 9 TiO2
epsr(10)= 6;%strato 10 vetro

% no. di strati
NL = length(d);

% intervallo di frequenza e no. di step in frequenza
f1 = 3;%decade frequenza iniziale di campionamento
f2 = 9;%decade frequenza finale di campionamento
Ns = 100;%numero step in frequenza;

```

Output del codice:

Il codice fornisce lo spettro in frequenza dell'efficienza di schermatura dello schermo, come mostrato in figura 2.3.3.2.

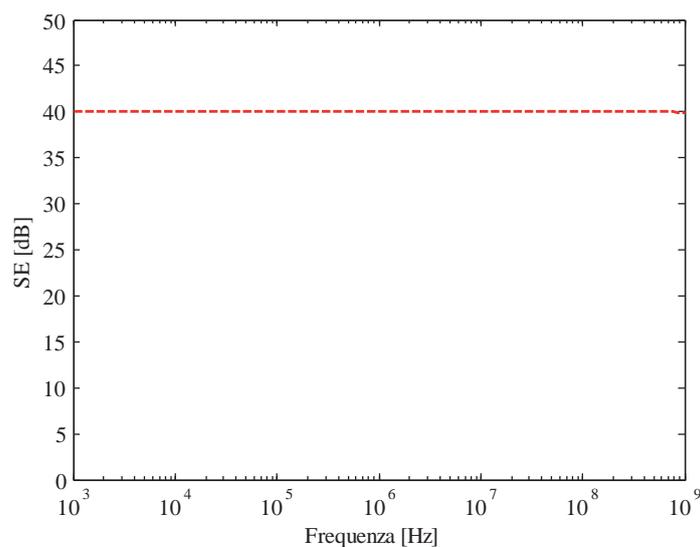


Figura 2.3.3.2 - Esempio di grafico prodotto dal codice di calcolo: spettro in frequenza della SE dello schermo di Figura 2.3.3.1.

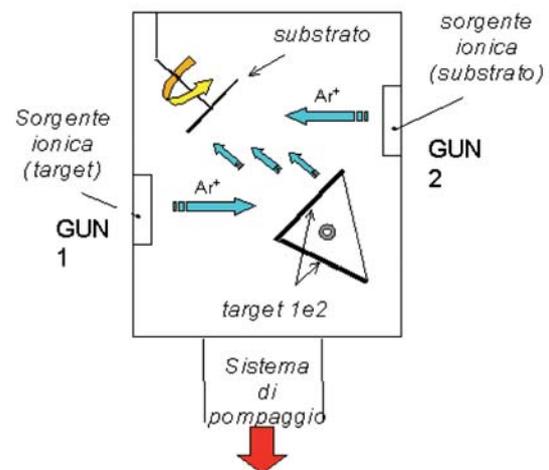
2.3.4 Stima di fattibilità

La realizzazione dei prototipi di film nanostrutturati multistrato è stata eseguita presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA.

La tecnica utilizzata per la deposizione di metalli trasparenti è lo *sputtering* a doppio fascio ionico (*DIBS*) (Figura 2.11) che è del tipo *PVD* (*physical vapor deposition*). Due sorgenti ioniche di Kaufman producono fasci di ioni di argo (Ar^+) all'interno di una camera sotto vuoto. Il substrato sul quale deve essere depositato il rivestimento multistrato è posizionato su di un supporto rotante, ed è inizialmente illuminato dal fascio ionico prodotto da una delle due sorgenti. Tale bombardamento ionico del substrato, prima della deposizione del film, ha la funzione di pulire il substrato, eliminando eventuali impurità, e di renderne attiva la superficie al fine di favorire l'adesione del rivestimento. Successivamente il target (ovvero materiale sorgente che deve essere depositato sul substrato) è investito dal fascio ionico prodotto dalla seconda sorgente, con un angolo di incidenza di 45° . Alcuni degli atomi del target, eccitati dall'energia cinetica trasferita a causa degli urti dagli ioni del fascio incidente, vengono scalzati e colpiscono la superficie del substrato, dando così inizio alla crescita del film. L'omogeneità dello spessore del rivestimento è garantita dalla continua rotazione del supporto del substrato.



(a)



(b)

Figura 2.3.4.1 - Immagine del sistema *DIBS* per la realizzazione dei prototipi di materiale (a) e schema di funzionamento (b).

La tecnica *DIBS* è stata individuata come ottimale per la realizzazione dei prototipi di schermo trasparente per diversi motivi. Innanzitutto è una metodologia di deposizione che, a differenza di tecniche largamente diffuse quali l'elettrodeposizione, la verniciatura spray o il plasma spray, consente di realizzare film sottili dello spessore anche della frazione di nanometro. Inoltre si possono utilizzare substrati plastici, ed i rivestimenti possono essere realizzati sia con materiali conduttori, che dielettrici, che semiconduttori. Inoltre il *DIBS* è una tecnica molto versatile che permette la deposizione di più materiali in uno stesso processo; quindi è particolarmente indicata per la realizzazione di film multistrato costituiti dalla sequenza periodica di rivestimenti in ma-

teriale conduttore e non. Si tratta inoltre di un metodo di deposizione a freddo, in quanto la temperatura durante il processo può salire di alcune decine di gradi appena (generalmente è intorno ai 50°C). Tale aspetto è di notevole importanza: infatti è possibile utilizzare substrati polimerici o plastici, anche se poiché il numero di periodi della struttura è elevato i tempi di deposizione possono essere lunghi e in generale dipendono dal tipo di materiale che si intende depositare.

Rispetto ad altre tecniche *PVD*, quali ad esempio lo *sputtering* a radiofrequenza o il magnetron *sputtering*, il *DIBS* consente di realizzare rivestimenti con migliore adesione grazie all'azione di attivazione della superficie del substrato effettuata da uno dei due cannoni ionici prima della deposizione del film (fase di etching del substrato).

La tecnica di *sputtering* è oggi diffusa a livello industriale. I costi di fabbricazione sono legati principalmente all'investimento iniziale necessario per l'acquisto e la messa a punto delle macchine di *sputtering*. La tecnica di deposizione inoltre è pulita e compatibile con l'ambiente in quanto non produce materiali di scarto o sostanze inquinanti da smaltire. Inoltre è adatta per la deposizione di film schermanti sia su substrato vetroso che polimerico.

2.4 Prestazioni del campione realizzato

Sono stati depositati i campioni A e C di tabella 2.3.2.1 su un substrato di vetro e il campione B su un foglio di plastica flessibile di spessore 100 µm poiché, in accordo con le simulazioni, ha le migliori proprietà isotropiche. I campioni sono stati realizzati mediante tecnica *DIBS* nel laboratorio Film sottili dell'ENEA. Film di titanio di 1 nm sono stati inseriti tra Ag e TiO₂.

La messa a massa del metallo trasparente è ottenuta mediante contatto diretto con il più esterno strato di Ag poiché l'ultimo strato di TiO₂ è depositato su una superficie ridotta. Gli strati interni di Ag sono fortemente accoppiati a quello messo a massa attraverso l'elevata capacità offerta dai film interni TiO₂/Ti.

La figura 2.4.1 mostra la foto del campione realizzato di tipo C che ha una quasi neutra risoluzione cromatica.



Figura 2.4.1 - Metallo trasparente C.

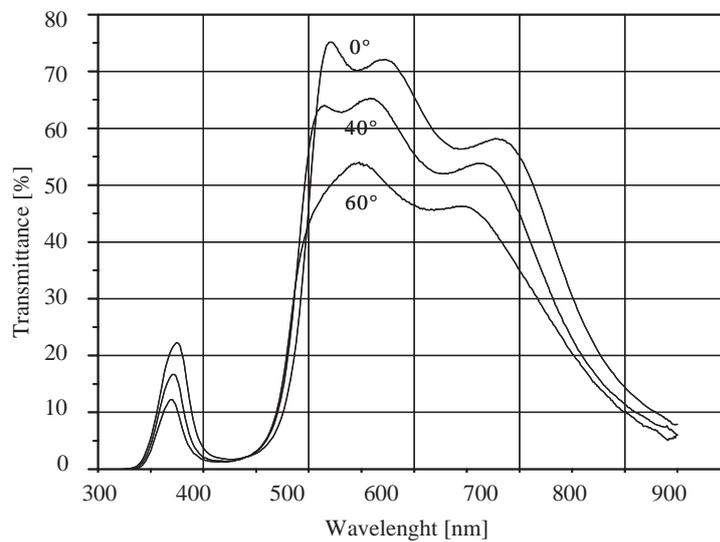
Sono stati realizzati test meccanici e di invecchiamento. L'adesione pratica è valutata seguendo la normativa MIL-A-A113 Rev C e la damp heat test secondo la ISO 9211-3: 1994(E) per rivestimenti ottici. Nel test di invecchiamento il campione è stato conservato a 55°C e 95% di umidità per 16 ore. Successivamente è stata misurata la sua trasmittanza e confrontata con quella registrata prima del test di invecchiamento. Risulta che le proprietà del film non vengono alterate dopo l'invecchiamento. Allo scopo di verificare le proprietà di adesione su strato flessibile, il campione B è piegato a 180° intorno a cilindri metallici di diverso diametro. L'adesivo tape,

certificato secondo le MIL A-A113 Rev. C è applicato sulla bend area del film e rimosso con a quick pull. Non si osservarono distacchi per diametri del cilindro inferiori a 1 mm.

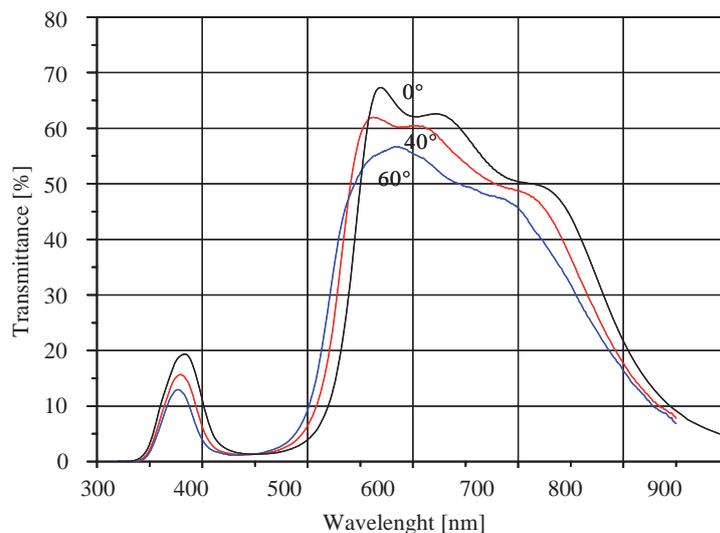
Gli spettri di trasmittanza per incidenza normale e obliqua furono registrati nel range visibile NIR (near infra-red) mediante la tecnica standard spettrofotometrica.

Gli spettri sperimentali di trasmittanza dei campioni A, B, C con strati di Ti di 0.5 nm sono rappresentati nelle figure 2.4.2 (a), (b) e (c) rispettivamente. I dati ottenuti si accordano bene con i risultati delle simulazioni numeriche delle figure 2.3.2.5 e 2.3.2.6. Si noti che il trend di T a 550 nm in funzione dell'angolo di incidenza per il campione B, è confermato dallo spettro di figura 2.4.2 (b).

Si è inoltre constatato che per incidenza normale i campioni A e C hanno la più elevata trasmittanza. Al contrario, il campione B ha la trasmittanza media limitata al 45%, ma è caratterizzato da eccellenti proprietà isotropiche.



(a)



(b)

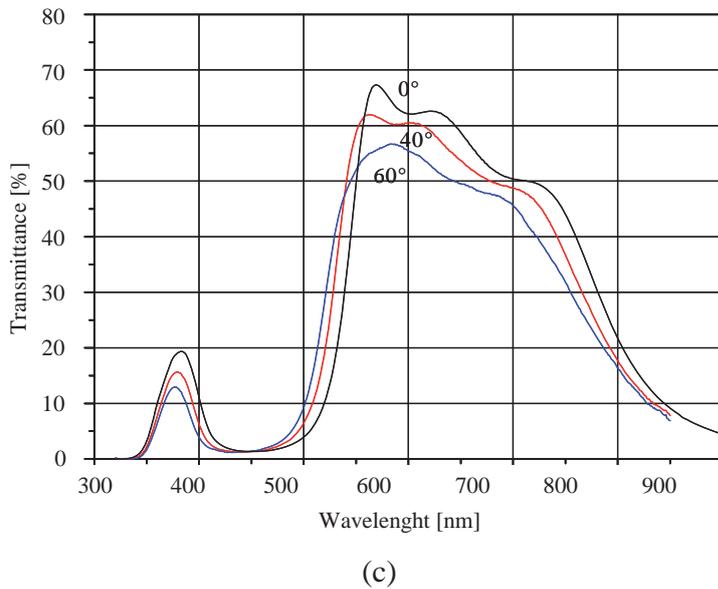


Figura 2.4.2 - Spettri misurati di trasmittanza dei campioni A (a), B (b), C (c) per angoli di incidenza di 0°, 40°, e 60°.

L'efficienza di schermatura del campione B su strato flessibile è stata misurata nel range 30 MHz – 6 GHz mediante lo standard ASTM-D-4935, ed anche mediante una nuova cella coassiale che estende il range di frequenza dello standard ATM.

La figura 2.4.3 mostra la *SE* misurata che si dimostra in buon accordo con quella calcolata. Si raggiunge il valore di 40 dB con spessore complessivo di argento di 68 nm. La differenza tra la misura e il calcolo si rileva tra 30 MHz e 50 MHz a causa del debole accoppiamento capacitivo tra le due flangie coassiali dello specimen holder.

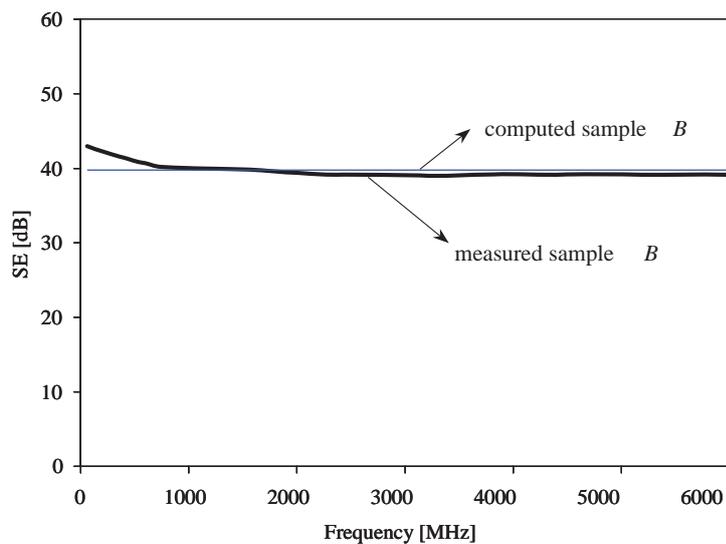


Figura 2.4.3 - Efficienza di schermatura del campione B calcolata e misurata.

Le strutture *PBG* sono ottimizzate con lo scopo di ottenere elevata trasmittanza ottica in ampio range di angoli di incidenza, a radio frequenza, trasparenti nel range visibile tra 400 nm e 700 nm.

Per le prestazioni ottiche si considerano le seguenti tre figure di merito: trasmittanza media per incidenza normale pesata dalla curva di responsivity dell'occhio umano, la trasmittanza media normalizzata per incidenza obliqua e la il fattore di qualità di trasmittanza.

I test di curabilità che comprendono i test di adesione e di invecchiamento devono essere eseguiti per verificare la resistenza verso sollecitazioni meccaniche e ambientali.

La trasmittanza nel visibile di circa il 65% e la trasmittanza del 75% possono essere raggiunte con un campione di limitata isotropia. Un migliore compromesso tra alta trasmittanza e alta isotropia è ottenuta da filtri a banda larga.

3 Considerazioni conclusive

Le misure di efficienza di schermatura di campioni di pellicole commerciali della SUN-GARD, utilizzate normalmente per la schermatura dell'irraggiamento solare all'infrarosso, hanno mostrato prestazioni di interesse, prima sconosciute agli stessi produttori, che sono state confermate nelle prove eseguite su campioni di finestre. I risultati sperimentali sono in buon accordo con quelli ottenuti con le simulazioni numeriche, sviluppate anche per la predizione della trasmittanza ottica nel visibile.

Si è quindi ritenuto opportuno estendere l'indagine ad altre pellicole allo scopo di individuare i campioni in grado di conciliare le prestazioni ottiche con quelle elettromagnetiche considerando che l'efficienza di schermatura diminuisce al crescere della trasmittanza nel visibile.

I dati ottenuti sono stati utilizzati per progettare ed ottimizzare tramite simulazioni numeriche le prestazioni schermanti e di controllo termico di strutture a sandwich composte da pellicole su vetro. L'indagine ha consentito di individuare le tipologie di maggiore interesse per le quali sono stati realizzati i campioni.

Le misure di efficienza di schermatura dei campioni sono state condotte tra alcuni megahertz e qualche gigahertz in guida d'onda. Lo spessore del vetro dei campioni, non inferiore a 2 mm, non è del tutto compatibile con le guide d'onda utilizzate soprattutto a bassa frequenza a causa dello scarso accoppiamento capacitivo delle flangie. Ciò ha determinato un'approssimativa coerenza con i risultati del calcolo. Al contrario ottimo accordo si è ottenuto per i risultati misurati e calcolati di trasmittanza ottica.

Infine la relazione svolta sugli schermi elettromagnetici trasparenti nanostrutturati offre nell'introduzione l'informazione sulle caratteristiche dei metalli trasparenti e nel seguito la procedura di progetto. L'analisi è corredata dalla descrizione di un campione realizzato in passato per dimostrare la fattibilità di tali strutture e l'accuratezza dei codici di calcolo per simulazioni numeriche elettromagnetiche ed ottiche. Va comunque rilevato che la realizzazione di schermi nanostrutturati di maggiori dimensioni richiede la disponibilità di adeguate strutture non facilmente reperibili, almeno a livello nazionale.

Riferimenti bibliografici

- [1] ASTM- D-4935, *Standard method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials*, Sept. 1989.
- [2] UNI EN 410, “*Vetro per edilizia – Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate*”, Marzo 2000.
- [3] Publication CIE No. 38 (TC-2.3), “*Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement*” (1977).
- [4] Publication CIE No. 15.2, *Colorimetry*, 2nd ed. (1986).
- [5] Publication CIE No. 85, *Solar spectral irradiance*, technical report (1989).
- [6] M.S. Sarto, A. Tamburrano, “*An innovative test method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range*”, IEEE Trans. on EMC, vol. 48, Issue 2, May 2006.
- [7] International Glazing Database (IGDB). Version 16.3. <http://windows.lbl.gov/materials/igdb>.
- [8] M. Rubin, K. Von Rottkay, R. Powles, *Window optics*, Solar Energy Vol. 62, No. 3, pp. 149–161, 1998.
- [9] B. Harbecke, “*Coherent and incoherent reflection and transmission of multilayer structures*”, Appl. Phys. B 39, 165–170, 1986.
- [10] ISO 9050, “*Glass in Building – Determination of Light Transmittance, Solar Direct Transmittance, Total Solar Energy Transmittance and Ultraviolet Transmittance and Related Glazing Factors*”, 1990.
- [11] *Silver in Handbook of optical constants of solids II*, E.D.Palik ed., Academic Press Inc., New York, 1991, pp.350-357.
- [12] J.A. Catrysse, “*Comparative study of different combinations of metallized non-woven shielding materials and an insulating substrate, for use as shielding envelopes and small shielding boxes*”, Proc. EMC'96 ROMA, International Symposium on EMC, Rome, Italy, Sept. 17-20, 1996, pp.562-568.
- [13] F. Grabner, J. Weiss, “*Development of flexible materials suitable for shielding electromagnetic waves over a wide range of frequencies*”, ITEM UPDATE 2000, pg. 46-52.
- [14] B. C. Jackson, T. W. Bleeks, “*Performance characteristics of conductive coatings for EMI control*”, ITEM 1999, pg.125.
- [15] M.S. Sarto, S. Di Michele, P. Leerkamp, “*Electromagnetic performances of innovative lightweight shields to reduce radiated emissions from PCBs*”, IEEE Trans. on EMC, May 2002.
- [16] M.S. Sarto, F. Sarto, M. Candidi, “*Ion beam sputtering of Fe-Hf-O ferromagnetic thin films for EMI shielding applications*”, 2003 IEEE Int. Symp. on EMC, Boston, Aug. 18-23, 2003.
- [17] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995.
- [18] E. Yablonovitch, “*Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics*”, Phys. Rev. Lett., Vol. 58, p. 2059-2062, 1987.

-
- [19] Special Issue of J. Opt. Soc. Am. B Vol. 10 on *Development and Applications of Materials Exhibiting Photonic Band Gaps*, edited by C.M. Bowden, J.P. Dowling, and H. O. Everitt, pp. 279-413, 1993.
- [20] S. John, “*Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*”, Phys. Rev. Lett., Vol. 58, p. 2486, 1987.
- [21] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, “*Photonic band structure: the face-centered-cubic case*”, J. Opt. Soc. Am. A Vol. 7, p. 1792, 1990.
- [22] M. Scalora, M.J. Bloemer, A.S. Manka, S.D. Pethel, J.P. Dowling and C.M. Bowden, “*Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures*”, Journ. Appl. Phys., Vol. 83, 1998, pp.2377-2383.
- [23] M.J. Bloemer, M. Scalora “*Transmissive properties of Ag/Mgf₂ photonic band gaps*”, Appl. Phys. Lett., Vol. 72, no.14, 1998, pp.1676-1678.
- [24] M.S. Sarto, F. Sarto, M.C. Larciprete, M. Scalora, M. D’Amore, C. Sibilia, M. Bertolotti, “*Nanotechnology of transparent metals for radio frequency electromagnetic shielding*”, IEEE Trans. on EMC, November 2003, pp. 586-594.
- [25] M.S. Sarto, F. Sarto, M.C. Larciprete, C. Sibilia, M. D’Amore, M. Bertolotti, M. Scalora, “*Nanolayered metal-based films for transparent EM shields*”, ICEAA 2003, Turin, Italy, Sept. 9-11, 2003.
- [26] F. Sarto, M.C. Larciprete, M.S. Sarto, C. Sibilia, “*Transparent films for electromagnetic shielding of plastics*”, Reviews on Advanced Materials Science, Vol. 5, 2003, p. 34-40.
- [27] M. D’Amore, M.S. Sarto, F. Sarto, M. Bertolotti, M.C. Larciprete, M. Scalora, M. Sibilia, “*Nanotechnology of transparent electromagnetic shields*”, Proc. of 15th Int. Zurich Symp. & Technical Exhibition on EMC, Zurich, Switzerland, February 18-20, 2003.
- [28] M.C. Larciprete, C. Sibilia, S. Paoloni, M. Bertolotti, F. Sarto, M. Scalora, “*Accessing the optical limiting properties of metallodielectric photonic band gap structures*”, J. Appl. Phys. Vol. 93, 2003, pp. 5013-5017.
- [29] ISO/CIE 10527: *Colorimetric Observers*, The International Standard ISO/CIE 10527; CIE Draft Standard DS 010.2/E-2001 Photometry - The CIE System of Physical Photometry; the Commission Internationale de l’Eclairage (CIE).
- [30] M. Bender, W. Seelig, C. Daube, H. Frankeberger, B. Ocker, J. Stollenwerk, “*Dependence of film composition and thickness on optical and electrical properties of ITO-metal-ITO multilayers*”, Thin Solid Films, Vol. 326, 1998, p. 67-71.
- [31] A. Tamburrano, M.S. Sarto, “*Electromagnetic characterization of innovative shielding materials in the frequency range up to 8 GHz*”, Proc. 2004 IEEE Int. Symp. on EMC, S. Clara, Aug. 2004.
- [32] M. D’Amore, S. Greco, D.A. Lampasi, M.S. Sarto, A. Tamburrano, “*Multifunctional nanostructured transparent coatings for hardening of aircraft windows against HIRF penetration*”, ESA Workshop on Aerospace EMC, Florence, March 31 - April 1 2009.
- [33] M.S. Sarto, R. Li Voti, F. Sarto, M.C. Larciprete, “*Nanolayered lightweight flexible shields with multidirectional optical transparency*”, IEEE Transactions on EMC, August 2005.

-
- [34] M. D'Amore, S. Greco, M.S. Sarto, "*Transparent electromagnetic shielding of enclosures against EMP penetration*", EUROEM 2008, July 21-25, 2008, Lausanne.
- [35] S. Greco, M.S. Sarto, A. Tamburrano, "*Shielding performances of ITO transparent windows: theoretical and experimental characterization*", EMC Europe, Hamburg, Sept. 2008.
- [36] C. G. Granqvist, A. Hultaker, "*Transparent and conducting ITO films*", *Thin Solid Films*, Vol. 411, 2002, pp. 1-5.
- [37] H. Izumi, T. Ishihara, H. Yoshioka, M. Motoyama, "*Electrical properties of crystalline ITO films prepared at room temperature by pulsed laser deposition on plastic substrates*", *Thin Solid Films*, Vol. 411, 2002, pp. 32-35.
- [38] G.B. Smith, G.A. Niklasson, J.S.E.M. Svensson, C.G. Granqvist, "*Noble-metal-based transparent infrared reflectors: experiments and theoretical analysis for very thin gold films*", *Journ. Appl. Phys.*, Vol. 59, 1986, pp. 571-581.
- [39] A. Kloppel, W. Kriegseis, B.K. Meyer, A. Scharmann, C. Daube, J. Stollenwerk, J. Trube, "*Dependence of the electrical and optical behaviour of ITO-silver-ITO multilayers on the silver properties*", *Thin Solid Films*, Vol. 365, 2000, pp. 139-146.
- [40] A. Kloppel, B.K. Meyer, J. Trube, "*Influence of substrate temperature and sputtering atmosphere on electrical and optical properties of double silver layer systems*", *Thin Solid Films*, Vol. 392, 2001, pp. 311-314.
- [41] J. Szczyrbowski, G. Brauer, M. Ruske, H. Schilling, A. Zmelty, "*New low emissivity coating based on TwinMag® sputtered TiO₂ and Si₃N₄ layers*", *Thin Solid Films*, Vol. 351, 1999, pp. 254-259.
- [42] Jang-Hoon Lee, Seung-Hyu Lee, Kwang-Lim Yoo, Nam-Young Kim, Chang Kwon Hwangbo, "*Deposition of a conductive near-infrared cutoff filter by radio frequency magnetron sputtering*", *Appl. Optics*, Vol. 41, 2002, pp. 3061-3067.
- [43] E. Caluri, F. Nanni, F. Sarto, M.S. Sarto, "*Enhancement of composite material shielding effectiveness by ion beam sputtering deposition of thin films*", *EMC Europe 2000 Brugge, 4th Intern. Symposium on EMC*, Brugge, Belgium, Sept. 11-15, 2000, Vol. 1, pp.483-488.
- [44] F. Sarto, M.C. Larciprete, C. Sibilìa, M. Bertolotti, "*Optimization of the optical properties of ZnO films deposited by dual ion beam sputtering*", *2nd International Workshop on Zinc Oxide*, October 23-25 (2002), Dayton, Ohio-MRS Workshop Series.
- [45] F. Sarto, M. Alvisi, E. Melissano, A. Rizzo, S. Scaglione, L. Vasanelli, "*Adhesion enhancement of optical coatings on plastic substrate via ion treatment*", *Thin solid films*, Vol. 346, 1999, pp.196-201.

APPENDICE A: PARAMETRI OTTICI E TERMICI DI UN VETRO

La trasmittanza T e la riflettanza R ottica sono esprimibili mediante le seguenti relazioni:

$$T(\lambda) = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

$$R(\lambda) = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

dove E_i , E_t , E_r sono rispettivamente le ampiezze del campo elettrico incidente, trasmesso e riflesso dal pannello e λ è la lunghezza d'onda espressa dal rapporto della velocità di propagazione del campo elettromagnetico nel vuoto ($c_0=3 \cdot 10^8$ m/s) e la sua frequenza f . L'assorbanza è di conseguenza definita come:

$$A(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda). \quad (\text{A.3})$$

Le precedenti grandezze sono in generale indicate per incidenza normale ma sono anche funzioni dell'angolo di incidenza della radiazione. Nel seguito questo aspetto verrà ignorato perché normalmente non viene considerato nelle specifiche dei prodotti e nelle normative.

Questa appendice considera le definizioni stabilite dalla norma UNI EN 410:2000 [2]. Altre definizioni introdotte in altre fonti possono leggermente differire soprattutto per le differenti lunghezze d'onda considerate. La norma UNI EN 410:2000 stabilisce un metodo semplificato per determinare le caratteristiche luminose e solari delle vetrate. Le caratteristiche sono determinate per una radiazione incidente prossima alla normale utilizzando come sorgenti la distribuzione di energia dell'illuminante D65 (definita dall'International Commission on Illumination) [4], della radiazione solare e della radiazione ultravioletta (UV) conformemente a 3 prospetti riportati dalla norma.

I parametri sintetici definiti dalla norma sono i seguenti:

- trasmittanza luminosa T_v e riflettanza luminosa R_v per l'illuminante D65;
- trasmittanza solare diretta T_e e riflettanza solare diretta R_e ;
- fattore di trasmissione dell'energia solare totale (fattore solare) g ;
- trasmittanza della radiazione ultravioletta UV T_{UV} .

La norma UNI EN 410:2000 suggerisce di calcolare la trasmittanza luminosa utilizzando la formula seguente:

$$T_v = \frac{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda T(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (\text{A.4})$$

dove D_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D65 [4], $V(\lambda)$ il fattore di visibilità spettrale della visione fotopica che definisce l'osservatore normalizzato per la fotometria e $\Delta\lambda$ è l'intervallo di lunghezze d'onda utilizzato per il calcolo (ovvero per la discretizzazione

dell'integrale con la sommatoria). Nelle norme tecniche tale intervallo è solitamente posto uguale a 5 nm o 10 nm. Il prospetto 1 della norma indica i valori di $D_\lambda V(\lambda)\Delta\lambda$ per intervalli di lunghezza d'onda pari a 10 nm, elaborati in modo tale che il denominatore sia uguale a 1.

Espressione formalmente uguale alla (A.4) ha la riflettanza nel visibile:

$$R_v = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda R(\lambda)V(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} D_\lambda V(\lambda)\Delta\lambda}. \quad (\text{A.5})$$

La trasmittanza diretta dell'energia solare T_e della vetrata viene calcolata utilizzando la formula seguente:

$$T_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda T(\lambda)V(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda V(\lambda)\Delta\lambda} \quad (\text{A.6})$$

in cui S è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare fornita nel prospetto 2 della norma elaborato in modo da avere denominatore unitario.

Analogamente, per la riflettanza diretta vale la definizione:

$$R_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda R(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda \Delta\lambda}. \quad (\text{A.7})$$

Il contributo della radiazione ultravioletta non è necessario né a fini termici né a fini di illuminazione. Al contrario, questo tipo di radiazioni accelerano notevolmente lo sbiadimento di mobili e tessuti (problema particolarmente sentito nei musei) e sono legate a molte malattie della pelle. Per questo è consigliabile che un vetro non lasci passare le lunghezze d'onda corrispondente all'UV. La radiazione solare globale contiene componenti nei sottointervalli UV-B (da 280 a 315 nm) e UV-A (da 315 a 380 nm). Nella norma viene fornita una distribuzione spettrale relativa normalizzata per la parte UV della radiazione solare, U_λ . Il prospetto 3 della norma fornisce i valori di $U_\lambda D_\lambda$ per intervalli di lunghezza d'onda di 5 nm nell'intervallo UV. Quindi la trasmittanza UV viene calcolata nel modo seguente:

$$T_{UV} = \frac{\sum_{\lambda=280\text{nm}}^{380\text{nm}} U_\lambda T(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=280\text{nm}}^{380\text{nm}} U_\lambda \Delta\lambda}. \quad (\text{A.8})$$

Il fattore di trasmissione dell'energia solare totale g viene calcolato come la somma di T_e e del fattore di scambio termico secondario della vetrata verso l'interno q_i risultante dalla trasmissione di calore per convezione e per irraggiamento nel lontano infrarosso della frazione della radiazione solare incidente che è stata assorbita dalla vetrata. Per il calcolo del fattore di scambio

termico secondario verso l'interno, q_i nel caso di vetrate singole può essere utilizzata la seguente formula semplificata:

$$q_i = A_e \frac{h_i}{h_e + h_i} \quad (\text{A.9})$$

dove A_e è l'assorbimento diretto ($A_e=1-R_e-T_e$), h_e e h_i sono rispettivamente i coefficienti di scambio termico verso l'esterno e verso l'interno della vetrata. Questi valori dipendono principalmente dalla posizione della vetrata, dalla velocità del vento, dalle temperature interna ed esterna ed inoltre dalla temperatura delle due superfici. Per semplificare sono state stabilite delle condizioni convenzionali (posizione della vetrata verticale, velocità del vento 4 m/s, emissività corretta della superficie esterna 0.837) che danno $h_e=23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $h_i=8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Per cui si ha:

$$g = T_e + A_e \frac{h_i}{h_e + h_i} \square T_e + 0.26A_e = 0.74T_e - 0.26R_e + 0.26 \quad (\text{A.10})$$

Ai fini della definizione delle prestazioni di un vetro a controllo solare, i parametri più significativi sono T_v e g . Un materiale risulta tanto più trasparente nel range del visibile quanto più è elevato il valore di T_v . L'energia solare totale trasmessa attraverso una superficie vetrata (responsabile del surriscaldamento dell'ambiente interno) è tanto più elevata quanto più è elevato il valore di g .

APPENDICE B: MODELLI E ALGORITMI PER LA SIMULAZIONE DELLE PROPRIETÀ OTTICHE

Le proprietà ottiche dei materiali possono essere modellate da un indice di rifrazione complesso $N=n-jk$ funzione della lunghezza d'onda λ . Da esso è possibile definire il coefficiente di attenuazione

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \frac{4\pi f k}{c} = \frac{2\omega k}{c} \quad (\text{B.1})$$

ed il fattore di assorbimento

$$\gamma = e^{-\alpha d} = e^{-\frac{4\pi k}{\lambda} d}. \quad (\text{B.2})$$

La trasmittanza ottica T e la riflettanza ottica R sono definite come rapporti tra le intensità dei campi elettromagnetici e quindi sono definite diversamente dai coefficienti di trasmissione τ e riflessione ρ tra due mezzi con indici di rifrazione n_0 e n_1 utilizzati comunemente per i campi elettromagnetici a radiofrequenza:

$$T = \frac{n_1}{n_0} |\tau|^2 = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (\text{B.3})$$

$$R = |\rho|^2 = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2. \quad (\text{B.4})$$

Nei modelli multistrato ottici è possibile distinguere tra interfacce “semplici”, ovvero contorni sottili infinitesimi tra materiali omogenei, e “complesse equivalenti”, con spessore finito ed eventualmente costituite da diversi strati. Per una interfaccia semplice l'assorbanza è sempre nulla e quindi la trasmittanza e la riflettanza interne tra due interfacce sono legate dai seguenti vincoli:

$$r_{12} = r_{21} = r_f = r_b = r, \quad t_{12} = t_{21} = 1 - r. \quad (\text{B.5})$$

L'assorbanza (equivalente) può non essere nulla per le interfacce complesse perché esse possono contenere diverse interfacce ed anche strati spessi. In questo caso risulta:

$$r_f \neq r_b \neq 1 - t \quad (\text{B.6})$$

e, più in generale, si ha:

$$r = 1 - t - a. \quad (\text{B.7})$$

Quindi, per una interfaccia complessa equivalente, la trasmittanza e la riflettanza interne (equivalenti) valgono:

$$t_{1\dots 2} = t_{2\dots 1} = t, \quad r_{1\dots 2} \neq r_{2\dots 1} \neq 1 - t. \quad (\text{B.8})$$

Per analogia con il modello esterno un ulteriore fattore di attenuazione γ può essere introdotto per tenere conto dell'eventuale assorbimento all'interno di uno strato. L'assorbanza (equivalente) di una interfaccia complessa è data da

$$a_{1...2} = 1 - t - r_{1...2}, \quad a_{2...1} = 1 - t - r_{2...1}. \quad (\text{B.9})$$

La trasmittanza e la riflettanza esterne, normalmente indicate nelle specifiche e misurabili con gli spettrofotometri, sono definite per una struttura immersa in aria che rappresenta il mezzo di ingresso ed uscita. In questo caso si ha:

$$T_f = T_b = T_{a...a} = T, \quad R_f \neq R_b \neq 1 - T. \quad (\text{B.10})$$

Un substrato come il vetro senza rivestimenti o pellicole è simmetrico e quindi completamente caratterizzato in linea di principio da due sole misure indipendenti: la trasmittanza esterna T_s e la riflettanza esterna R_s del substrato che possono essere ipotizzate identiche da entrambi i lati. Tali grandezze possono essere espresse in termini della trasmittanza interna da interfaccia semplice t_{as} e delle relative riflettanze $r_{as}=r_{sa}=1-t_{as}$ delle interfacce substrato-aria e dell'assorbimento interno γ_s . Le espressioni delle trasmittanze esterne possono essere invertite ottenendo:

$$r_s = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_s)R_s}}{2(2 - R_s)} \quad (\text{B.11})$$

in cui

$$\beta = T_s^2 - R_s^2 + 2R_s + 1. \quad (\text{B.12})$$

Si ha quindi:

$$\gamma_s = \frac{R_s - r_s}{r_s T_s} \quad (\text{B.13})$$

$$\alpha_s = -\frac{\ln \gamma_s}{d_s} \quad (\text{B.14})$$

Le stesse proprietà possono essere estese a qualunque spessore del substrato. Per scegliere un nuovo spessore d_2 diverso dall'originale d_1 , l'assorbimento interno del substrato può essere espresso nella seguente forma:

$$\gamma_{s2} = \gamma_{s1}^{\frac{d_2}{d_1}}. \quad (\text{B.15})$$

Inoltre un rivestimento può essere trasferito su un substrato di tipo diverso. Per trasferire il rivestimento su un diverso substrato occorre separare il vecchio substrato e combinare il rivestimento con il nuovo. Se il rivestimento è incognito ma le proprietà del substrato sono note (con le precedenti equazioni), il sistema è asimmetrico; in tale caso occorrono tre misure indipendenti, una di trasmittanza e due di riflettanza da entrambi i lati ("forward" e "backward"). La trasmittanza esterna di una pellicola applicata su un substrato risulta

$$T_g = \frac{(1 - r_{as})t_{acs}\gamma_s}{1 - r_{as}r_{sca}\gamma_s^2} = \frac{t_{as}t_{sca}\gamma_s}{1 - r_{as}r_{sca}\gamma_s^2} \quad (\text{B.16})$$

In cui $r_{\text{sca}}=r_{\text{cf}}$ è la riflettanza interna del rivestimento (coating) misurata dal substrato all'aria (ovvero invertito) e r_{as} è la riflettanza interna dal substrato all'aria senza rivestimento. La riflettanza dal lato frontale, che normalmente coincide con quello del substrato senza rivestimento, è data da:

$$R_{\text{gf}} = r_{\text{as}} + \frac{(1-r_{\text{as}})^2 r_{\text{sca}} \gamma_s^2}{1-r_{\text{as}} r_{\text{sca}} \gamma_s^2} \quad (\text{B.17})$$

e la riflettanza dal lato posteriore (normalmente quello del rivestimento) vale:

$$R_{\text{gb}} = r_{\text{acs}} + \frac{t_{\text{sca}}^2 r_{\text{as}} \gamma_s^2}{1-r_{\text{as}} r_{\text{sca}} \gamma_s^2}. \quad (\text{B.18})$$

Dalle formule (B.11)-(B.14) è possibile ottenere le proprietà r_s e t_s del substrato. Conoscendo queste è possibile ricavare le proprietà di un film invertendo le (B.16)-(B.18). In particolare, r_{sca} appare linearmente solo nella (B.17) e pertanto può essere derivato dalla seguente espressione:

$$r_{\text{sca}} = \frac{R_{\text{gf}} - r_{\text{as}}}{[1 + r_{\text{as}} (R_{\text{gf}} - 2)] \gamma_s^2}. \quad (\text{B.19})$$

Successivamente, da questa si può ottenere:

$$t_{\text{sca}} = \frac{T_g (1 - r_{\text{as}} r_{\text{sca}} \gamma_s^2)}{(1 - r_{\text{as}}) \gamma_s} \quad (\text{B.20})$$

e quindi:

$$r_{\text{acs}} = R_{\text{gb}} - \frac{t_{\text{sca}}^2 r_{\text{as}} \gamma_s^2}{1 - r_{\text{as}} r_{\text{sca}} \gamma_s^2}. \quad (\text{B.21})$$

I parametri ricavati dalle (B.19)-(B.21) forniscono tutte le informazioni utili per applicare le pellicole in una struttura complessa.

APPENDICE C: CODICE DI CALCOLO DELL'EFFICIENZA DI SCHERMATURA DI UNO SCHERMO MULTISTRATO NANOSTRUTTURATO

```
% main_SE_multi_read.m
%Calcola la SE di uno schermo multistrato
%
clear all
format short e

%-----
%  DATI DI INPUT

% spessori strati
d(1) = 32e-9; %strato 1 TiO2
d(2) = 17e-9; %strato 2 Ag
d(3) = 64e-9; %strato 3 TiO2
d(4) = 17e-9; %strato 4 Ag
d(5) = 64e-9; %strato 5 TiO2
d(6) = 17e-9; %strato 6 Ag
d(7) = 64e-9; %strato 7 TiO2
d(8) = 17e-9; %strato 8 Ag
d(9) = 32e-9; %strato 9 TiO2
d(10)= 3e-3; %strato 10 vetro

% conducibilità elettrica strati
sigma(1) = 1e-12;%strato 1 TiO2
sigma(2) = 7.75e6%strato 2 Ag
sigma(3) = 1e-12;%strato 3 TiO2
sigma(4) = 7.75e6%strato 4 Ag
sigma(5) = 1e-12;%strato 5 TiO2
sigma(6) = 7.75e6%strato 6 Ag
sigma(7) = 1e-12;%strato 7 TiO2
sigma(8) = 7.75e6%strato 8 Ag
sigma(9) = 1e-12;%strato 9 TiO2
sigma(10)= 1e-12; %strato 10 vetro

% permittività dielettrica relativa strati
epsr(1) = 70; %strato 1 TiO2
epsr(2) = 1; %strato 2 Ag
epsr(3) = 70; %strato 3 TiO2
epsr(4) = 1; %strato 4 Ag
epsr(5) = 70; %strato 5 TiO2
epsr(6) = 1; %strato 6 Ag
```

```

epsr(7) = 70;      %strato 7 TiO2
epsr(8) = 1;      %strato 8 Ag
epsr(9) = 70;      %strato 9 TiO2
epsr(10)= 6;      %strato 10 vetro

% no. di strati
NL = length(d);

% intervallo di frequenza e no. di step in frequenza
f1 = 3;          %decade frequenza iniziale di campionamento
f2 = 9;          %decade frequenza finale di campionamento
Ns = 100;        %numero step in frequenza;
freq=logspace(f1,f2,Ns);

% -----
% Inizio calcolo

amu0 = 4e-7*pi;
eps0=1/(36*pi)*1e-9;
c0 = 1/sqrt(amu0*eps0);
eta0 = sqrt(amu0/eps0);

% -----
% CALCOLO FUNZIONE
s=i*2*pi*freq;

for j=1:Ns
    fi = zeros(2,2);
    fi(1,1) = 1;
    fi(2,2) = 1;

    %calcola parametri ogni layer
    for n=1:NL
        epsrc = epsr(n) + sigma(n)/(s(j)*eps0);
        zc = eta0/sqrt(epsrc);
        m = s(j)*sqrt(epsrc)/c0;
        fi_loc(1,1) = cosh(m*d(n));
        fi_loc(2,2) = cosh(m*d(n));
        fi_loc(1,2) = zc*sinh(m*d(n));
        fi_loc(2,1) = sinh(m*d(n))/zc;
        fi = fi*fi_loc;
    end

    SE = 0.5*(eta0*fi(2,1)+fi(1,1)+fi(2,2)+fi(1,2)/eta0);
    SE_dB(j) = 20*log10(abs(SE));
end

```

```
% -----  
% PLOT DEI RISULTATI  
  
figure(3)  
plot(freq,SE_dB,'b');  
axis auto  
hold on  
  
% -----  
% FINE
```

Finito di stampare nel mese di maggio 2010
presso la Tipolitografia CSR
Via di Pietralata, 157 - 00158 Roma
Tel. 06.4182113 - Fax 06.4506671



ISBN 978-88-448-0431-2



9 788844 804312