

## Progettazione di risonatori per misure EPR non distruttive in banda X

L.Di Trocchio<sup>1,3,4</sup>, C.De Angelis<sup>1,4</sup>, G.De Angelis<sup>1</sup>, S.Della Monaca<sup>1,4</sup>, L.Ficcadenti<sup>4</sup>, M.Lucentini<sup>1,4</sup>,  
A.Mostacci<sup>2,4</sup>, L.Piersanti<sup>4</sup>, S.Pisa<sup>3,4</sup>, E.Pittella<sup>3</sup>, M.C.Quattrini<sup>1,4</sup>, F.Santavenere<sup>1,4</sup>, P.Fattibene<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Superiore di Sanità, Roma

<sup>2</sup> Università "La Sapienza", Dip. Scienze di base e applicate per ingegneria, Roma

<sup>3</sup> Università "La Sapienza", Dip. Ingegneria dell'informazione, elettronica e telecomunicazioni, Roma

<sup>4</sup> Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione Roma 1, Roma

e-mail: [luigi.ditrocchio@gmail.com](mailto:luigi.ditrocchio@gmail.com)

### INTRODUZIONE

Negli spettrometri di risonanza paramagnetica elettronica (EPR) convenzionali il campione è inserito all'interno di cavità risonanti che hanno dimensioni che tipicamente spaziano dal centimetro al sottomillimetrico. I campioni da misurare devono quindi avere dimensioni inferiori al centimetro o, quando possibile, devono essere ridotti in frammenti o in polvere, e quindi distrutti. A partire dalla letteratura, espressamente orientata a misure in vivo su denti [1, 2, 3, 4], sono state progettate tre cavità, compatibili con spettrometri commerciali in banda X (9.6 GHz) e finalizzate alla misura della dose retrospettiva in schermi di telefoni mobili [5]. L'idea è quella di utilizzare cavità cilindriche, aventi un'elevato fattore di merito non caricato ( $Q_u$ ), progettate per lavorare su modi che presentino una regione, lungo la parete laterale, in cui sia massimo il campo magnetico e minimo il campo elettrico. In corrispondenza di questa regione è realizzata una fessura che permetta la fuoriuscita del campo magnetico alle microonde, limitatamente alla porzione di spazio prossima all'apertura, dove verrà posto il campione. In questo lavoro sono presentati i criteri utilizzati per la scelta dei modi risonanti, il dimensionamento delle strutture e i risultati ottenuti dalle simulazioni, effettuate con l'uso del software Microwave Studio (CST) per quanto riguarda il campo a 10 GHz ed EM Studio (CST) per il campo di modulazione a 100 kHz.

### MATERIALI E METODI

#### 1. STIMA DELLA SENSIBILITÀ DI CAVITÀ APERTE PER EPR

Il segnale EPR [6, 7] è direttamente proporzionale al seguente parametro:

$$\Pi = \frac{1}{2} \eta Q_u \quad (1)$$

Dove  $Q_u$  è il fattore di merito non caricato del risonatore, mentre  $\eta$  è il filling factor, definito come il rapporto fra l'energia magnetica presente sul campione e quella totale:

$$\eta = \frac{\int_{sample} H_1^2 dV}{\int_{cavity} H_1^2 dV + \int_{airbox} H_1^2 dV} \quad (2)$$

Nella (2),  $H_1$  è il modulo del campo magnetico alle microonde. Il box d'aria, contenente il campione, è stato introdotto per considerare il campo che fuoriesce dalla struttura.

#### 2. SCELTA DEI MODI RISONANTI

Al fine di soddisfare i requisiti presentati in precedenza sono stati presi in considerazione risonatori aventi: elevato  $Q_u$ ; una regione sulle pareti in cui sia massimo il campo magnetico, minimo il campo elettrico e in cui la corrente superficiale sia il più possibile rettilinea per permettere il disegno di una fessura non radiante [8]; corrente superficiale nella regione in cui si chiuderà il risonatore, ovvero il perimetro di una delle due basi del cilindro, più bassa possibile per non degradare le prestazioni del risonatore una volta realizzato.

Si è constatato che le strutture che meglio si prestano agli scopi prefissati sono quelle che eccitano i modi  $TE_{X11}$ , con X numero naturale. In Fig. 1 sono riportati gli andamenti del campo magnetico ed elettrico, al centro della struttura, per i modi  $TE_{111}$ ,  $TE_{211}$  e  $TE_{311}$ . Al crescere di X il fattore di merito aumenta, ma il valore massimo del campo magnetico decresce e quindi diminuisce il campo che fuoriesce dalla struttura. Per  $X > 3$  il

valore di campo magnetico diventa troppo basso e si ha una decrescita del filling factor non più compensabile dall'incremento del  $Q_u$ .

### 3. PROGETTO DELLE CAVITÀ

A partire dall'espressione della frequenza di risonanza per i modi TE in strutture cilindriche con il vuoto all'interno [9], si è costruito il seguente sistema:

$$\begin{cases} f_{x11} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{p'_{x1}}{a}\right)^2 + \left(\frac{1\pi}{d}\right)^2} \\ f_{x11} = 9.6 \text{ GHz} \\ AR = \frac{2a}{d} \end{cases} \quad (4)$$

Dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto,  $a$  e  $d$  sono il raggio e la lunghezza della cavità e  $p'_{x1}$  è la prima radice della funzione di Bessel del primo tipo di ordine  $X$ . Nella (4) si è quindi posto  $X=1,2,3$  e si è variato il rapporto d'aspetto  $AR$  in modo da trovare i valori di  $a$  e  $d$  tali da massimizzare il  $Q_u$  ed il valore del modulo del campo magnetico in prossimità della regione in cui verrà praticata l'apertura. Al fine di ricondursi all'applicazione reale, si sono connessi i risonatori ad una guida d'onda rettangolare tramite un foro di forma rettangolare con gli angoli smussati e le dimensioni del foro sono state ottimizzate, al variare dei modi, in modo da ottenere l'accoppiamento critico tra guida d'onda e risonatore. Per la sua alta conducibilità elettrica si è scelto di utilizzare l'argento per modellizzare le strutture simulate.

### 4. GEOMETRIA E DIMENSIONE DELL'APERTURA

A partire dalle strutture chiuse si è praticato un foro la cui forma è stata ottimizzata, considerando anche i limiti fisici delle apparecchiature utilizzate per la realizzazione delle strutture. Lo spessore dell'apertura è stato fissato a 0.5 mm e si sono effettuate analisi parametriche al variare dell'altezza ( $h_{\text{slit}}$ ) e della larghezza ( $w_{\text{slit}}$ ) della stessa. Al fine di valutare la sensibilità dei risonatori si sono posti un campione, avente dimensioni 10 x 6 x 0.5 mm, ed un box di  $2a \times 2d \times 2a$  mm in modo tale che una delle due facce più estese di questi componenti coincidesse con la faccia esterna del risonatore in cui si è praticata l'apertura. Al crescere delle dimensioni della fessura si ha un incremento del filling factor ma un decremento del fattore di merito, entrambi dovuti alla maggiore quotaparte del campo magnetico che fuoriesce dalla struttura.

### 5. CAMPO DI MODULAZIONE.

Per simulare la presenza del campo ad audiofrequenza, che deve essere il più omogeneo possibile sul campione, si sono disegnate due bobine di Helmholtz poste a distanza coincidente con il gap fra i due elettromagneti per il campo statico di un risonatore commerciale, pari a 7 cm. Le bobine sono state posizionate in maniera tale che il loro asse passasse per la parete esterna in cui è stata effettuata l'apertura e orientate in maniera tale da avere il campo di modulazione ortogonale a quello a microonde. Le coil sono state alimentate da una corrente AC a 100 kHz di intensità tale da ottenere nel vuoto, al centro dell'asse, un campo di intensità di picco pari a circa 4 G.

## RISULTATI

### 1. DIMENSIONI DELLE CAVITÀ E STIMA DELLA SENSIBILITÀ

Nella seguente tabella sono riportate le dimensioni delle cavità e delle rispettive aperture, le frequenze di risonanza ed i parametri utilizzati per la stima della sensibilità, delle strutture che meglio soddisfano i requisiti presentati in precedenza.

Modo risonante	a (mm)	d (mm)	$h_{\text{slit}}$ (mm)	$w_{\text{slit}}$ (mm)	$f_{\text{ris}}$ (GHz)	$Q_u$	$\eta \cdot 10^{-4}$	$\Pi$
TE <sub>111</sub>	11.5	25.6	10	3	9.578	10985	1.65	0.91
TE <sub>211</sub>	17	34.1	10	3.5	9.602	12167	1.71	1.04
TE <sub>311</sub>	24.9	28.5	8	4	9.594	13516	1.64	1.11

## 2. CONSIDERAZIONI SULLA PRESENZA DEL CAMPO DI MODULAZIONE

Come indicato in precedenza, il campo ad audiofrequenza deve essere il più omogeneo possibile sul campione. A causa della presenza delle discontinuità aria-metallo ai bordi del risonatore e soprattutto in corrispondenza dell'apertura, si sono registrati picchi dell'intensità di campo magnetico sul campione. Per limitare questo effetto si è disegnata una fessura profonda 1 mm, per i TE111 e TE211, e 0.8 mm per il TE311. La larghezza è stata impostata coincidente con la larghezza dell'apertura e la lunghezza è stata fissata pari a quella dell'intera struttura. Oltre a questo si sono aumentate le dimensioni esterne laterali del risonatore, in maniera tale da far allontanare la discontinuità aria-metallo dalla regione dell'apertura (Fig. 2).

## DISCUSSIONE e CONCLUSIONI

Sono state progettate tre cavità, compatibili con spettrometri commerciali in banda X. Come aspettato, al crescere dell'ordine dei modi si ha un incremento del fattore di merito ma una diminuzione del filling factor. Si sono quindi aumentate le dimensioni dell'apertura al fine di compensare questo effetto. Dalle simulazioni si conclude che le tre cavità lavorano in banda X, hanno Q sufficientemente elevato e sensibilità comparabile. Inoltre, tramite l'introduzione della fessura e delle protrusioni laterali, si è riuscito ad aumentare l'omogeneità del campo di modulazione, aspetto critico delle misure EPR.

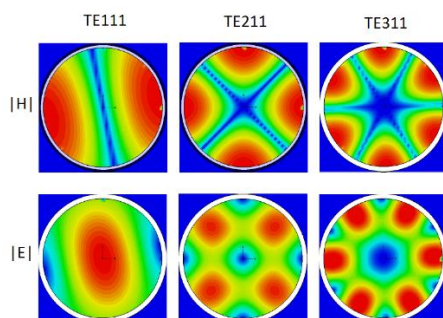


Fig. 1 – Distribuzioni del modulo del campo magnetico  $H$  e di quello elettrico  $E$  al variare dell'ordine dei modi.

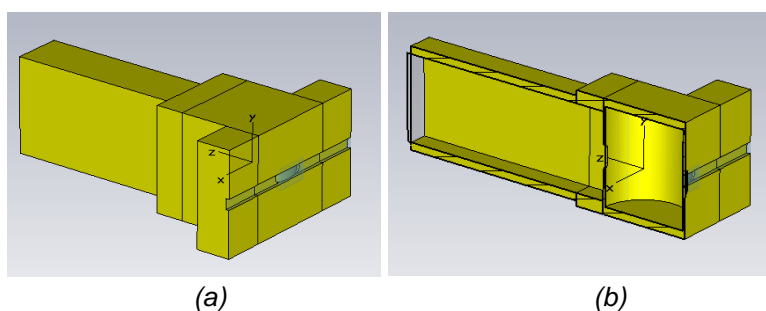


Fig. 2 – Il risonatore TE111 comprensivo di apertura e guida d'onda: Visione prospettica (a) e prospettica della sezione (b).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Ishii and M. Ikeya. *Jpn. J. Appl. Phys.* **1990**, 29, 871-875
- [2] J. Guo, J. Cong, K. Wu. *Appl. Magn. Reson.* **2013**, 44.8, 869-881
- [3] J. Guo et al. *Appl. Magn. Reson.* **2015**, 46.10, 1099-1107
- [4] J. Guo, Q. Yuan, J. Cong, et al. *PLoS ONE*, **2014**, 9 (9)
- [5] P. Fattibene et al. *Radiat. Envir. Bioph.* **2014**, 53 (2), 311-320
- [6] G. R. Eaton et al. *Quantitative EPR*, **2010**, Springer-Verlag/Wien, cap. 7
- [7] C. P. Poole. *Electron Spin Resonance*, **1983**, John Wiley e sons, cap. 11
- [8] S. Silver. *Microwave Antenna Theory And Design*, **1949**, McGraw-Hill, cap. 9
- [9] D. M. Pozar. *Microwave Engineering*, **2010**, Wiley, cap. 6