



## ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

LA TOMOGRAFIA A RESISTENZA ELETTRICA DI MATERIALI IN FILM SOTTILE: ATTIVITÀ IN INRIM E INTERAZIONE CON CONSORZI DI RICERCA

This is the author's accepted version of the contribution published as:

*Original*

LA TOMOGRAFIA A RESISTENZA ELETTRICA DI MATERIALI IN FILM SOTTILE: ATTIVITÀ IN INRIM E INTERAZIONE CON CONSORZI DI RICERCA / Cultrera, A.; Serazio, D.; Arduino, A.; Zilberti, L.; Jestin, S.; Milano, G.; Raso, F.; Callegaro, L. - (2024), pp. 213-215. (Intervento presentato al convegno VIII Forum Nazionale delle Misure 2024 tenutosi a San Vincenzo (LI) nel 12-14 Settembre 2024).

*Availability:*

This version is available at: 11696/82241 since: 2025-01-10T16:43:09Z

*Publisher:*

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

GMEE

Copyright degli Autori

(Article begins on next page)

## LA TOMOGRAFIA A RESISTENZA ELETTRICA DI MATERIALI IN FILM SOTTILE: ATTIVITÀ IN INRIM E INTERAZIONE CON CONSORZI DI RICERCA

A. Cultrera<sup>(1)</sup>, D. Serazio<sup>(1)</sup>, A. Arduino<sup>(1)</sup>, L. Zilberti<sup>(1)</sup>,  
S. Jestin<sup>(2)</sup>, G. Milano<sup>(1)</sup>, F. Raso<sup>(3)</sup>, L. Callegaro<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Strada delle Cacce 91, 10135 Torino (IT)

<sup>(2)</sup>CANOE – Bât Cheminnov – ENSCBP, 16 Avenue Pey Berland, 33600 Pessac (FR)

<sup>(3)</sup>Centro Español de Metrología (CEM). C. Alfar 2, 28760-Tres Cantos (ES)

mail autore di riferimento: a.cultrera@inrim.it

### 1. INTRODUZIONE

La tomografia a resistenza elettrica, ERT, produce una mappa della conducibilità di un campione a partire da una serie di misure di resistenza. L'ERT nasce (con la controparte in regime alternato EIT, tomografia a impedenza) per applicazioni cliniche e in geologia. Successivamente è stata usata per la verifica dell'omogeneità del drogaggio in wafer di silicio per l'elettronica. INRIM ha impiegato la ERT per lo studio di film sottili conduttivi, grafene e materiali nanostrutturati [1]. A differenza delle tecniche tipo van der Pauw, l'ERT dà informazioni sulle proprietà elettriche locali del campione. Le tipiche implementazioni di ERT consentono di mappare campioni su scala millimetrica. Non trattandosi di una tecnica a scansione, il tempo di misura dipende dal numero di contatti e non dalle dimensioni del campione stesso. Nell'ERT la mappa di conducibilità  $\sigma$  si ottiene risolvendo il problema inverso

$$\min_{\sigma} \sum_{s=1}^N \frac{1}{2} \|R^s(\sigma) - R_{meas}^s\|_2^2, \quad (1)$$

dove  $R_{meas}^s$  è l' $s$ -esimo vettore delle misure di resistenza mentre  $R^s(\sigma)$  è l' $s$ -esimo vettore delle soluzioni del problema diretto per una data distribuzione di  $\sigma$ . Ciascun indice  $s$  corrisponde a una delle  $N$  stimolazioni dei contatti. Il problema (1) si risolve con tecniche di ottimizzazione, usando metodi numerici per la soluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali. La discretizzazione del problema (1) è di solito mal condizionata in quanto molto sensibile al rumore di misura, per cui si introduce un termine di regolarizzazione. La risoluzione spaziale delle mappe ERT è principalmente limitata dal numero di contatti e quindi dalla quantità di informazione indipendente inclusa in  $R_{meas}^s$ .

### 2. ATTIVITÀ ALL'INRIM: APPARECCHIATURE E SOFTWARE

INRIM sviluppa sistemi di misura e, più recentemente, anche solutori, per la ricostruzione delle mappe ERT dal 2015. In figura 1-a è mostrato il sistema ERT di INRIM. Il sistema è basato su una sorgente di corrente/tensione (Keithley 2602B), un commutatore a relè *reed* (Keysight 34480) e un nano-voltmetro (Keysight 24420). Questi permettono di effettuare misure di transresistenza in varie configurazioni. Sono disponibili due porta campioni, mostrati in figura 1-b, uno con contatti sul bordo ed uno con contatti a griglia, entrambi con 16 contatti. Al momento è in fase di sviluppo una camera di misura stagna che permetta di eseguire misure in condizioni ambientali controllate. Il ricostruttore attualmente in fase di sviluppo in INRIM è specifico per la tomografia su materiali a film sottile. Esso è basato su una regolarizzazione a variazione totale anisotropa e ottimizzazione per mezzo di un algoritmo *Fast Iterative Shrinkage-Thresholding* (FISTA) [2]. Questa implementazione prevede l'aggiunta al funzionale (1) del termine

$$\lambda_{TV} \left( \|\partial_x \sigma\|_1 + \|\partial_y \sigma\|_1 \right), \quad (2)$$

dove  $\partial_x \sigma$  e  $\partial_y \sigma$  sono le derivate parziali lungo le direzioni cartesiane  $x$  e  $y$  di  $\sigma$ . La soluzione del problema diretto, necessaria per valutare  $R^s(\sigma)$ , è ottenuta per mezzo del metodo delle celle [3].

La mappa di conducibilità di un film in fibre di carbonio grafenizzate per collettori di carica di SC ottenuta con questo solver è riportata in figura 1-c.

### 3. INTERAZIONE CON CONSORZI DI RICERCA

Le prime implementazioni di ERT in INRIM sono legate al progetto GRACE [4] ed hanno prodotto le prime mappe di conducibilità di film di ossidi conduttivi trasparenti di grafene su larga area (ordine dei centimetri quadrati). In seguito, il sistema di misura è stato usato per caratterizzare reti di nanofili metallici durante il progetto MEMQUD [5], volto alla ricerca di proprietà memristive dei materiali per applicazioni in elettronica e metrologia. Nel progetto COMET [6] l'ERT è stata invece applicata a materiali di tipo MOF, con potenziali applicazioni in ambito effetto Hall quantistico. Infine, sono al momento in corso caratterizzazioni di materiali basati su grafene del progetto EMPHASIS [7], mirato allo sviluppo di supercondensatori (SC) in economia circolare, di cui è riportata in figura 1-c una mappa ERT di materiali per collettori di carica per SC misurata in INRIM.

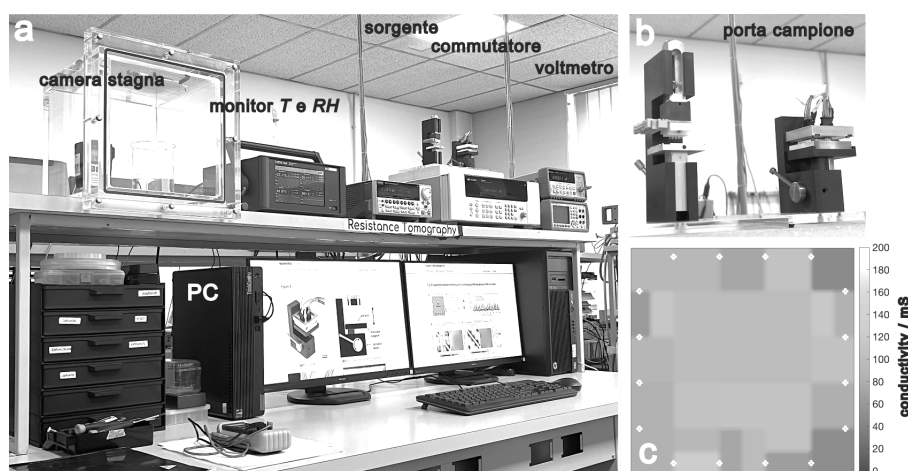


Figura 1 - Sistema ERT dell'INRIM (a). Due portacampioni a 16 contatti (b). Mappa di conducibilità di un campione in fibra di carbonio grafenizzato ( $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ) per collettori di carica di SC del progetto EMPHASIS.

### 4. RINGRAZIAMENTI

This work was supported by the European projects i) 20FUN06 MEMQUD, ii) 20FUN03 COMET, iii) 16NRM01 GRACE; these projects received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. This work was supported by the European Union under Horizon Europe in the framework of the EMPHASIS Project under Grant 101091997.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] A. Cultrera et al., "Mapping the conductivity of graphene with Electrical Resistance Tomography," Scientific Reports, 9 (1), 10655, 2019.
- [2] A. Beck e M. Teboulle, "A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems," SIAM Journal on Imaging Sciences, 2 (1), 183–202, 2009.
- [3] P. Alotto, F. Freschi, M. Repetto e C. Rosso, The Cell Method for Electrical Engineering and Multiphysics Problems: An Introduction. In Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 230, Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-36100-5
- [4] EMPIR 16NRM01 GRACE <https://empir.npl.co.uk/grace/>.
- [5] EMPIR 20FUN06 MEMQUD <https://memqud.inrim.it/>.
- [6] EMPIR 20FUN03 COMET <https://comet.imdea.eu/>.
- [7] HORIZON EUROPE EMPHASIS <https://www.emphasis-supercaps.eu/>.