

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale ***«Aerogel di Carbonio nella Tecnologia Stealth»***

Tutor universitario:

Prof.ssa Roberta Bertani

Padova, 24/07/2026

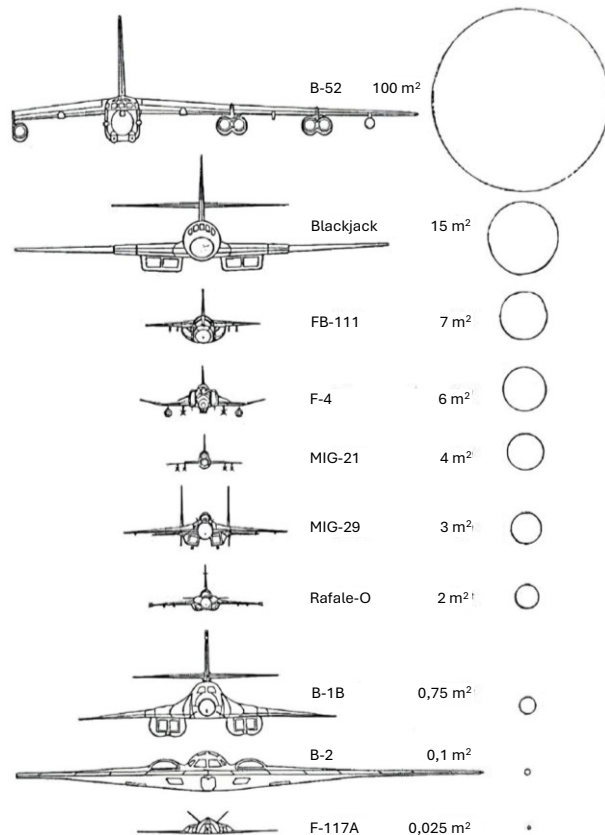
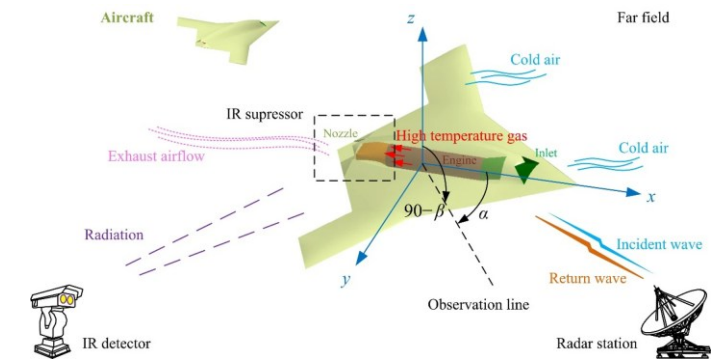
Laureando: *Zanon Matteo*

Matricola: 1223367



Chengdu J-20 Mighty Dragon

STEALTH: Aereo (detto anche *invisibile* o *furtivo*) che, per effetto della sua stessa conformazione, o di vernici protettive, ovvero di contromisure elettroniche, è difficilmente rilevabile dai radar. Lo stesso nome viene dato anche a un aereo che emette una radiazione infrarossa molto limitata.



**FIRMA RADAR
(RADAR CROSS
SECTION)**

**VISIBILITÀ
INFRAROSSA**

TEST ACUSTICI

FIRMA VISIVA

SHAPING

**MATERIALI
RADAR-
ASSORBENTI
(RAM)**

**FIRMA
ELETTO-
MAGNETICA**

**TEST OPERATIVI
SUL CAMPO**

**SIMULAZIONI
SOFTWARE**



Northrop Grumman
B-2 Spirit



Lockheed Martin
F-22 Raptor



Lockheed F-117
Nighthawk



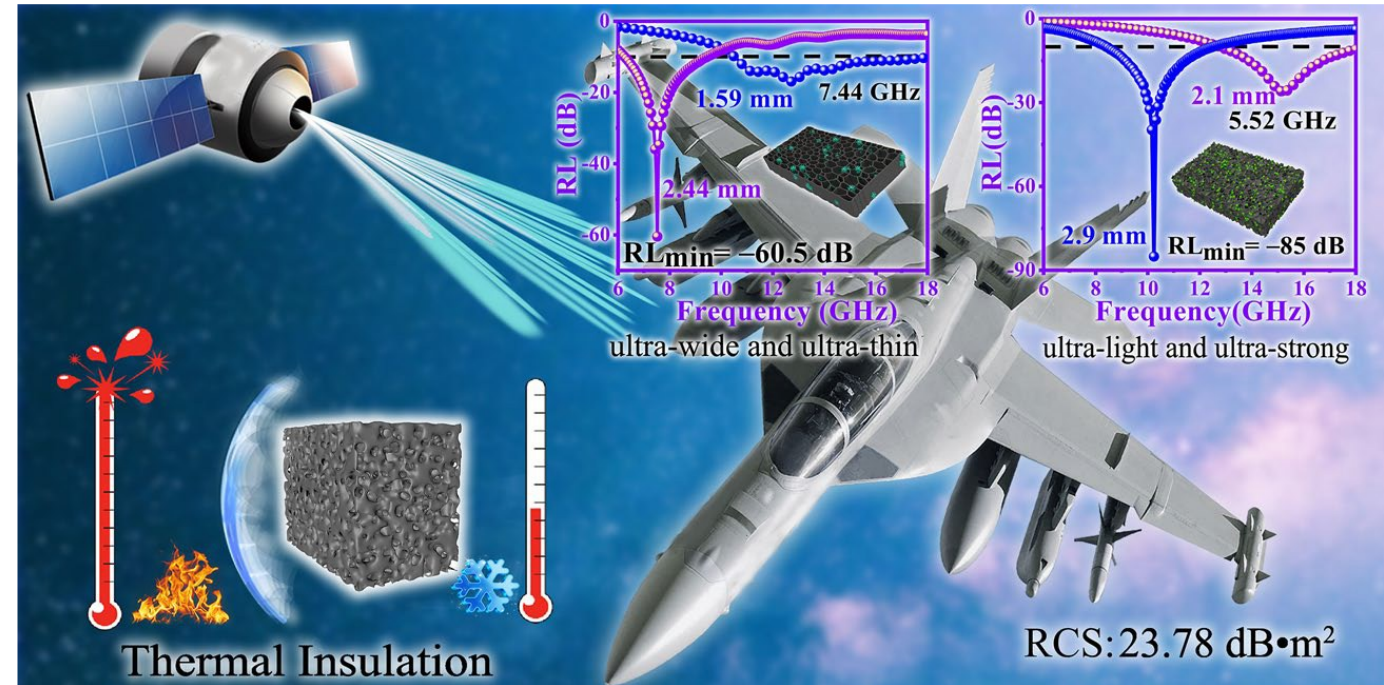
Sukhoi Su-57 Felon

Onde elettromagnetiche:

- Comunicazioni wireless e rilevamento radar.
- Inquinamento elettromagnetico e riduzione dell'efficacia di armi militari.
- Ricerca su materiali assorbenti per onde elettromagnetiche (**EMWA**).

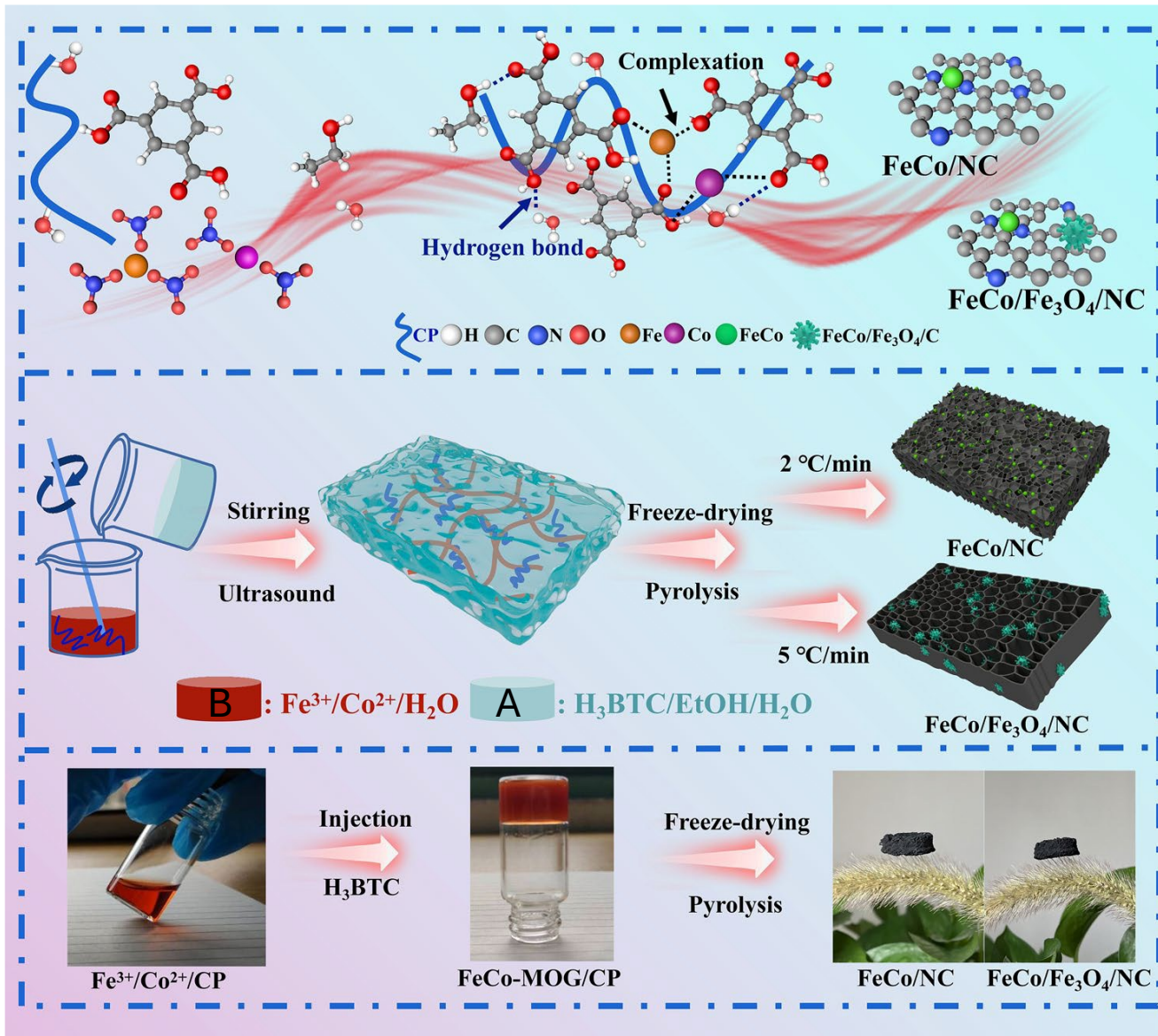
Aerogel di carbonio:

- **Leggeri e multifunzionali:** combinati con particelle magnetiche per migliorare l'impedenza.
- **Problema:** particelle magnetiche tendono ad aggregarsi, limitando le prestazioni.



Soluzione:

- **Metallo-organic frameworks (MOFs)** come precursori: struttura uniforme e prevengono l'accumulo di particelle.
- Compositi derivati da **gel metallo-organici (MOG)** e **peptidi di collagene (CP)**: composizione variabile, omogeneità chimica, forma regolabile e struttura porosa.



Sintesi di FeCo-MOG/CP

SOLUZIONE A: 1 g di H₃BTC + 10 mL di etanolo + 3 mL di acqua deionizzata → agitazione ultrasonica.

SOLUZIONE B: 0,75 g di Fe(NO₃)₃·9H₂O + 0,55 g di Co(NO₃)₂·6H₂O + 1 g di CP → disciolti in 5 mL di acqua deionizzata.

SOLUZIONE B aggiunta alla SOLUZIONE A e mescolata. Dopo alcuni minuti si forma l'idrogel **FeCo-MOG/CP** → rimosso dallo stampo e posto su un piatto di evaporazione → liofilizzato per 48 ore → **FeCo-MOG/CP secco**.

Sintesi di FeCo/NC e FeCo/Fe₃O₄/NC

Gel FeCo-MOG/CP → 2h pirolisi in forno a tubo sotto protezione di N₂ → **600 °C** e **700 °C**, velocità di riscaldamento di **2 °C/min** e **5 °C/min** → aerogel **FeCo/NC** e **FeCo/Fe₃O₄/NC**. Nel primo caso il ferro viene completamente ridotto con un tempo di calcinazione più elevato.

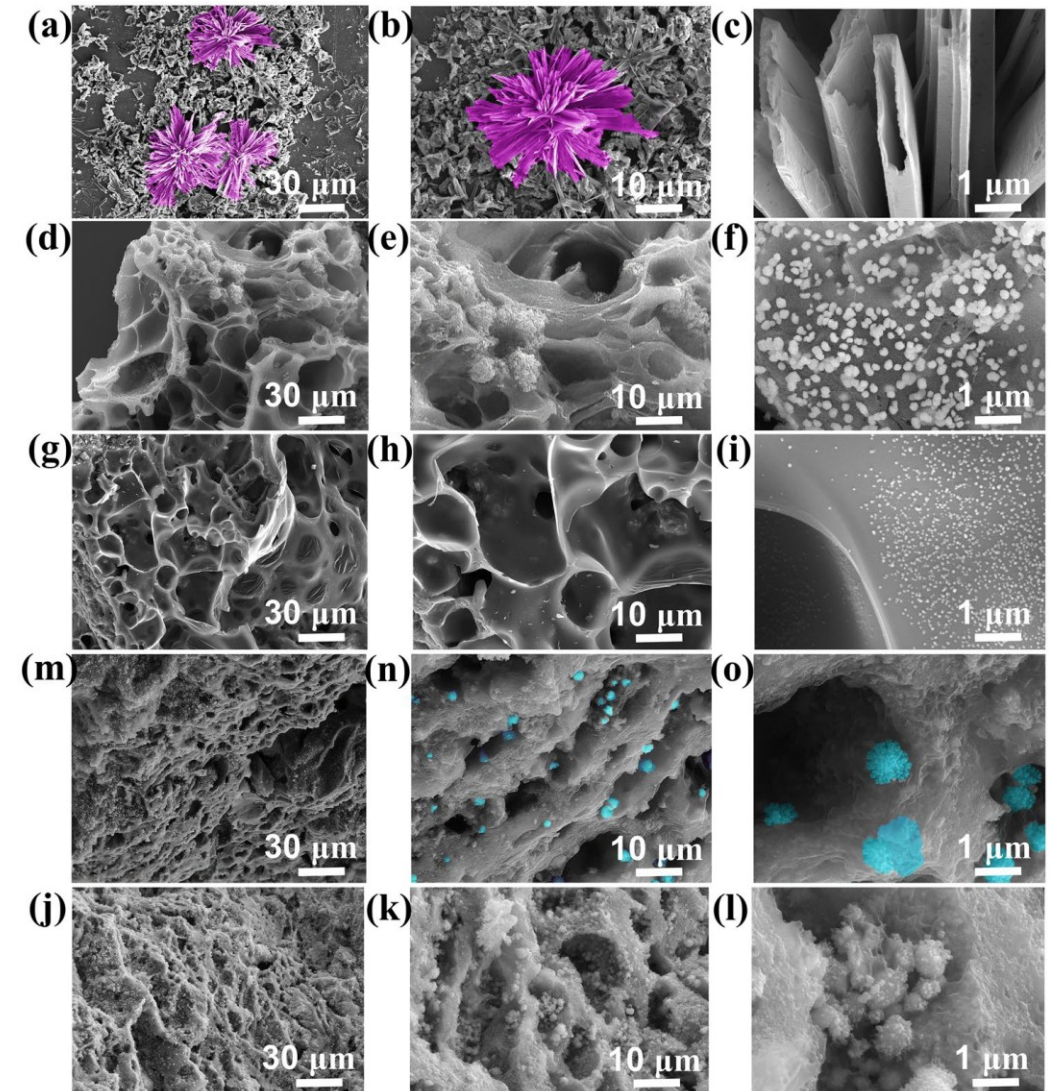
Gel secco **FeCo-MOG/CP**: morfologia simile a fiori, composta da fibre cave che aumentano la porosità degli aerogel derivati. Dopo la carbonizzazione, gli aerogel mantengono una struttura porosa regolare con particelle magnetiche distribuite uniformemente.

FeCo/NC-700:

Vel_{risc} 2 °C/min: Struttura setosa con particelle **FeCo** più piccole disperse uniformemente. La bassa velocità di riscaldamento favorisce la dissociazione delle particelle a forma di **virus**.

FeCo/Fe₃O₄/NC-600:

Vel_{risc} 5 °C/min: Struttura a wafer → tempo di calcinazione più breve e minore perdita di carbonio. Le particelle magnetiche, simili a **virus**, sono saldamente attaccate alla matrice di carbonio, grazie all'effetto Kirkendall.



Immagini SEM di **a-c** FeCo-MOG/CP asciutto, **d-f** FeCo/NC-600, **g-i** FeCo/NC-700, **j-l** FeCo/ Fe₃O₄/NC-600, e **m-o** FeCo/ Fe₃O₄/NC-700.

FeCo/NC-700:

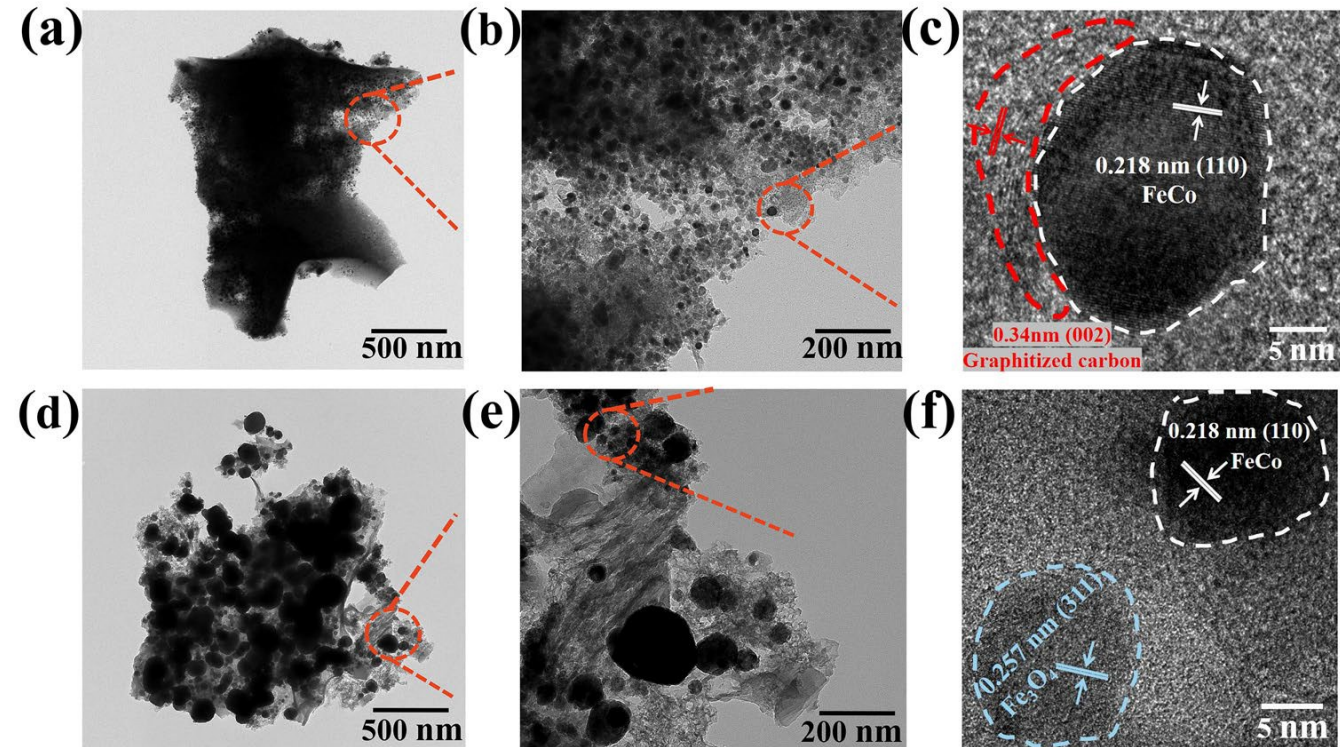
Particelle **FeCo** (circa **10 nm**):

- sparpagliate uniformemente nella matrice di **carbonio azotato (NC)** → efficace incorporazione delle particelle nell'aerogel.
- L'elevata grafittizzazione del carbonio favorisce la separazione delle particelle magnetiche dalla matrice di carbonio.

FeCo/Fe₃O₄/NC-600:

Particelle **FeCo** e **Fe₃O₄** (tra **10** e **200 nm**):

- sparpagliate nella matrice di **carbonio azotato (NC)**.
- maggiore presenza di ossigeno confermata da formazione di Fe₃O₄ → dovuto da aumento della velocità di riscaldamento e caratterizzato da particelle più grandi rispetto ad FeCo.



Immagini TEM di **a–c** FeCo/NC-700, e **d–f** FeCo/Fe₃O₄/NC-600.

XRD (diffrazione a raggi-X) :

Picchi dei precursori **FeCo-MOG/CP**: alta purezza.
FeCo/Fe₃O₄/NC: picchi di **Fe₃O₄**, più deboli di quelli FeCo, evidenziano una quantità limitata di questo ossido.

Raman (spettroscopia):

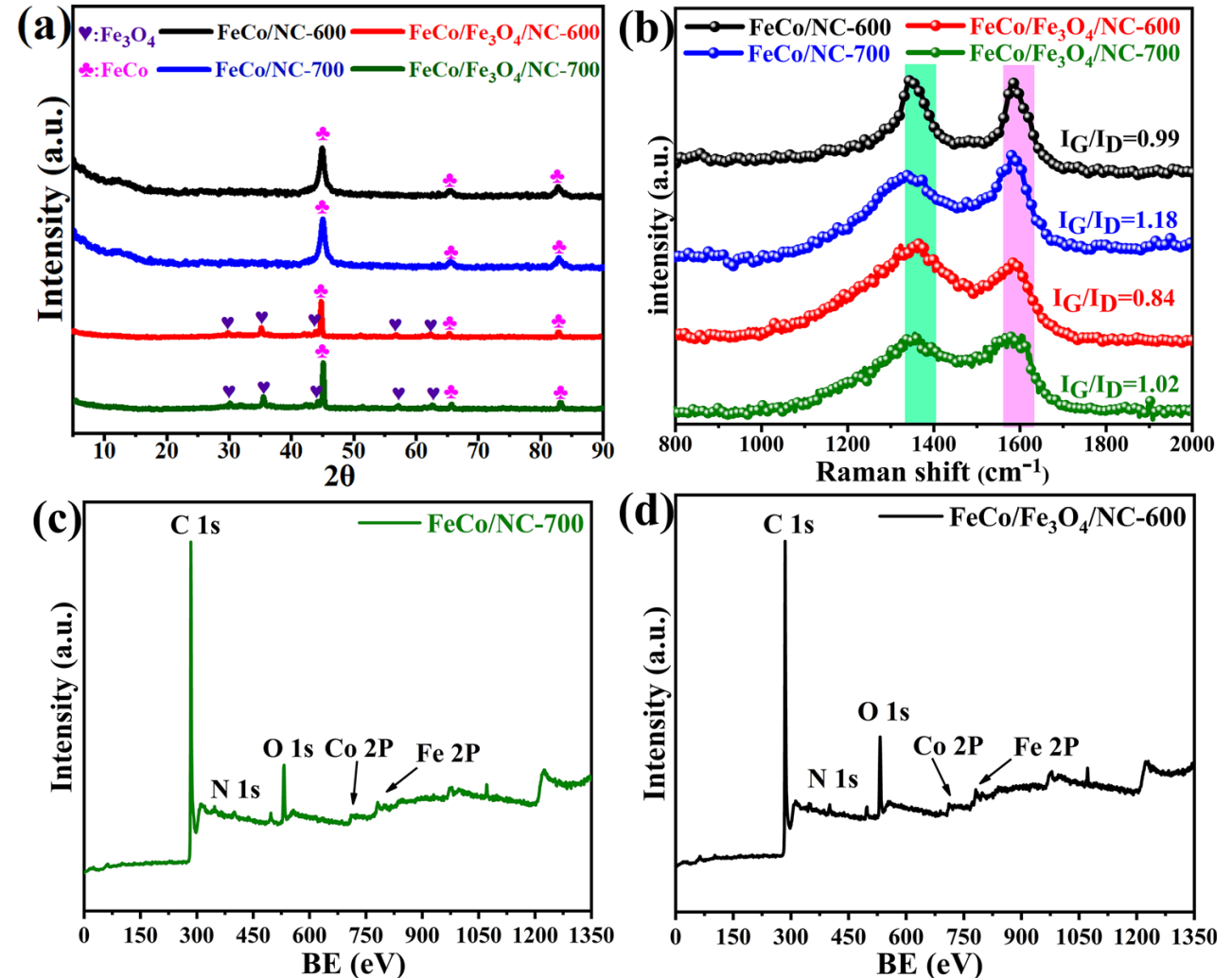
Aumento di temperatura e tempo di carbonizzazione incrementa il grado di grafittizzazione.

XPS (analisi chimica di superficie):

Entrambi i campioni contengono C, N, O, Fe e Co.

Spettro N 1s: evidenzia azoto piridinico, pirrolico e grafítico, confermando il **doping con azoto**.

Spettro Fe 2p: evidenzia Fe⁰, Fe²⁺ e Fe³⁺; la maggiore quantità di Fe²⁺ e Fe³⁺ in FeCo/Fe₃O₄/NC-600 riflette la presenza di **Fe₃O₄**.



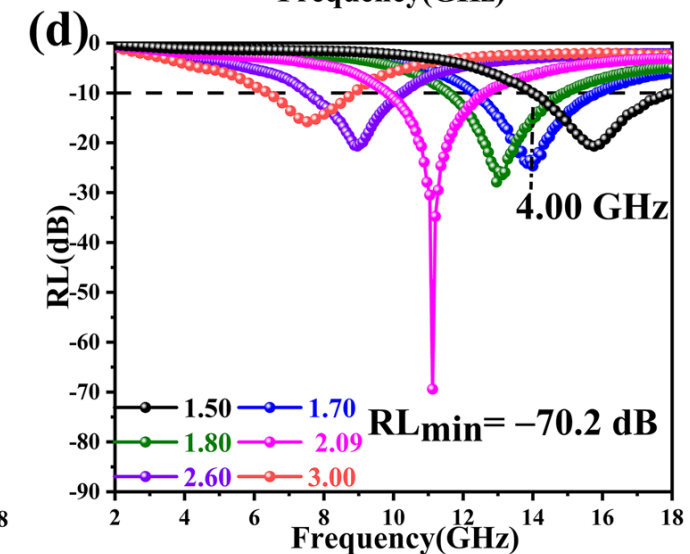
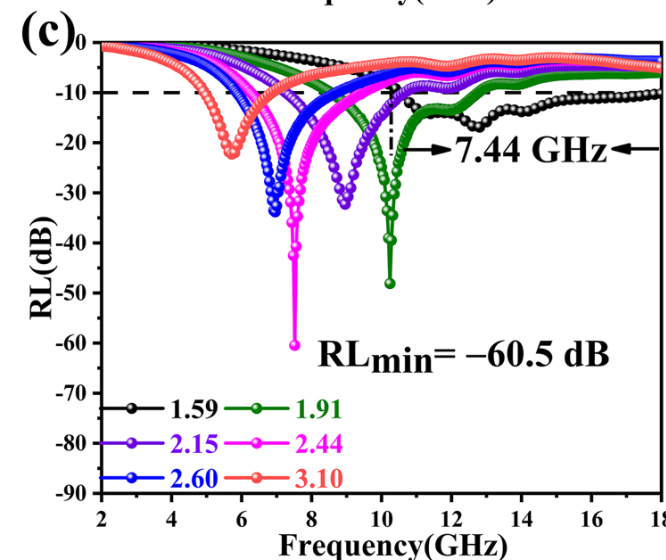
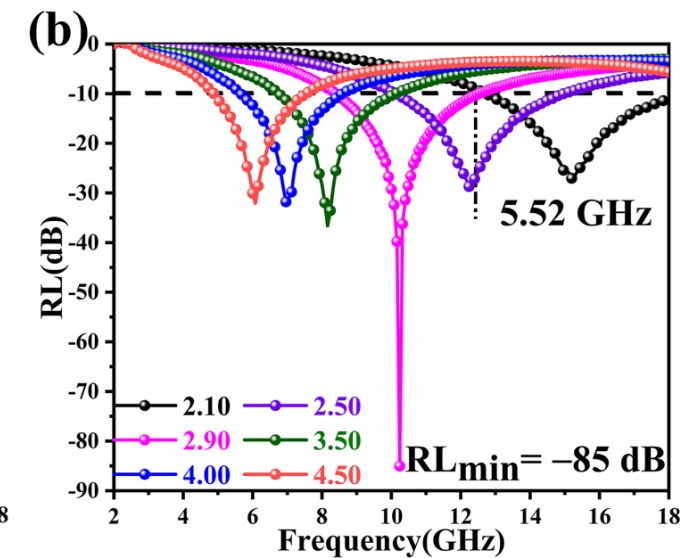
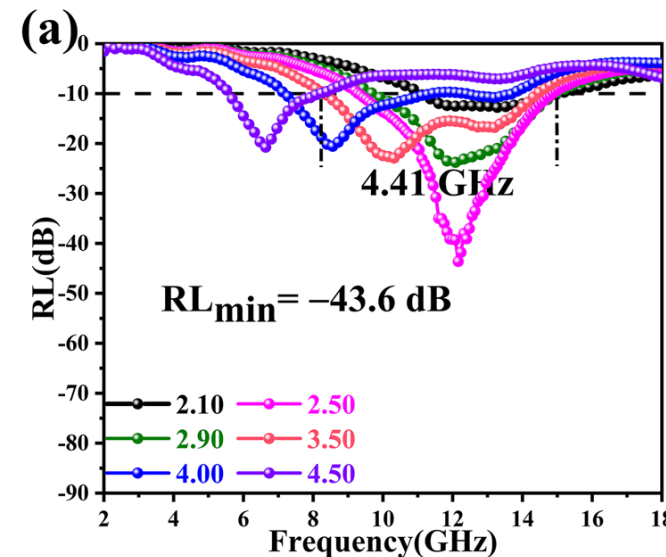
a Modelli XRD; **b** Spettro Raman; Spettro XPS di **c** FeCo/Fe₃O₄/NC-600, e **d** FeCo/NC-700.

Prestazioni EMWA FeCo/NC-700:

- $RL_{\min}$ (riflettività minima) di **-85 dB** a **10,24 GHz** con spessore di **2,90 mm**.
- Banda di assorbimento efficace $f_e=5,52$ GHz a **2,1 mm**.

Prestazioni EMWA FeCo/Fe₃O₄/NC-600:

- $RL_{\min}$ di **-60,5 dB** a **7,52 GHz** con spessore di **2,44 mm**.
- Banda di assorbimento efficace più ampia ($f_e=7,44$ GHz) con spessore ultra-sottile di **1,59 mm** (10,56–18,00 GHz).



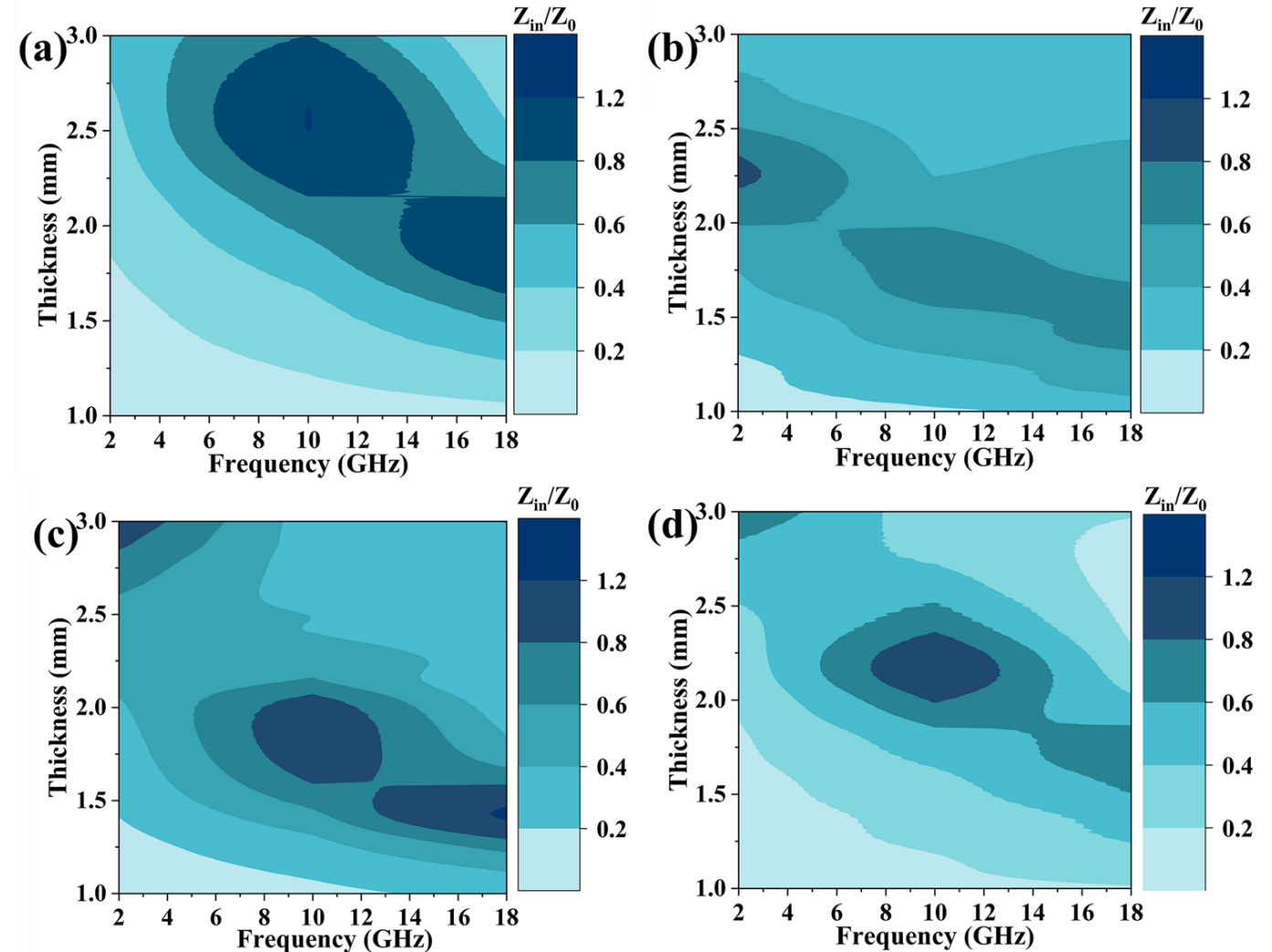
Valori RL di **a** FeCo/NC-600, **b** FeCo/NC-700, **c** FeCo/Fe₃O₄/NC-600, e **d** FeCo/Fe₃O₄/NC-700.

Abbinamento di impedenza:

- **FeCo/NC-700:** $|Z_{in}/Z_0|$ tra 0,8 e 1,2 su uno spessore da 1,5 a 3,0 mm.
- **FeCo/Fe₃O₄/NC-600:** stesso intervallo di $|Z_{in}/Z_0|$ ma spessori ridotti, da 1,2 a 2,1 mm.

Costante di attenuazione (α)

- **FeCo/NC-700:** con $\alpha=169$ e $|Z_{in}/Z_0|=1.00$ prestazioni ultra-efficaci $\rightarrow RL_{min} = -85$ dB con un rapporto di carico basso del 5%: assorbe oltre il 99,999999% delle EMW.
- **FeCo/Fe₃O₄/NC-600:** spessore di 1,59 mm, combina un buon abbinamento di impedenza ($|Z_{in}/Z_0|$ 0,5–1) con α tra 150 e 335 $\rightarrow$ forte perdita di EMW.



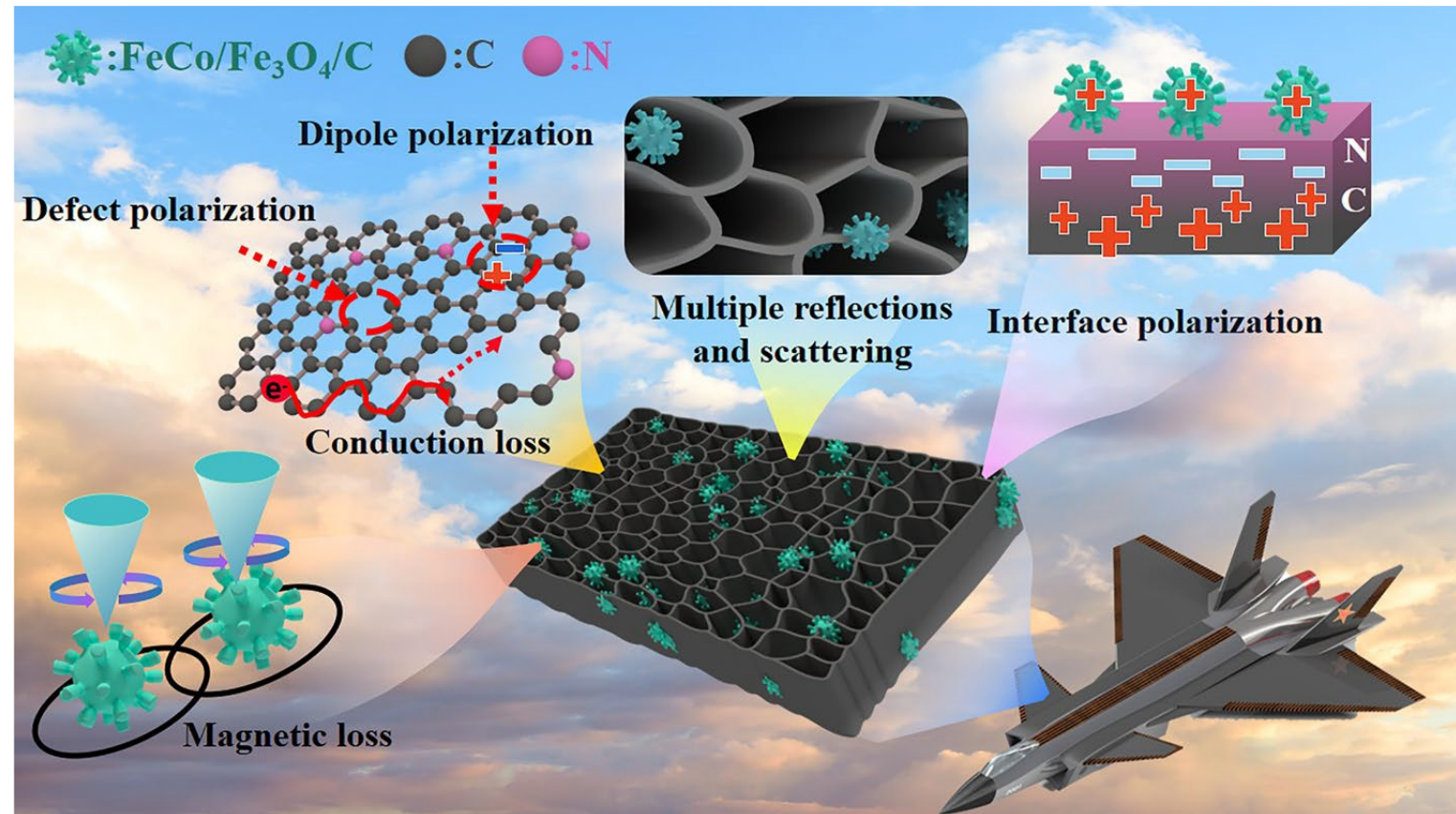
$|Z_{in}/Z_0|$ di **a** FeCo/NC-600, **b** FeCo/NC-700, **c** FeCo/Fe₃O₄/NC-600, e **d** FeCo/Fe₃O₄/NC-700 per differenti frequenze e spessori.

Ruolo dei pori:

- Facilitano l'**ingresso delle EMW**, migliore abbinamento di impedenza.
- Creano percorsi per **riflessioni e dispersioni multiple**, potenziano l'attenuazione delle onde.

Perdita per conduzione:

- Rete conduttiva di **carbonio azotato (NC)** con particelle magnetiche.
- **Micro-correnti** indotte da campi magnetici alternati: EMW convertite in calore da collisioni di elettroni.
- Aumento della **temperatura di calcinazione** incrementa il grado di grafittizzazione e le perdite per conduzione.



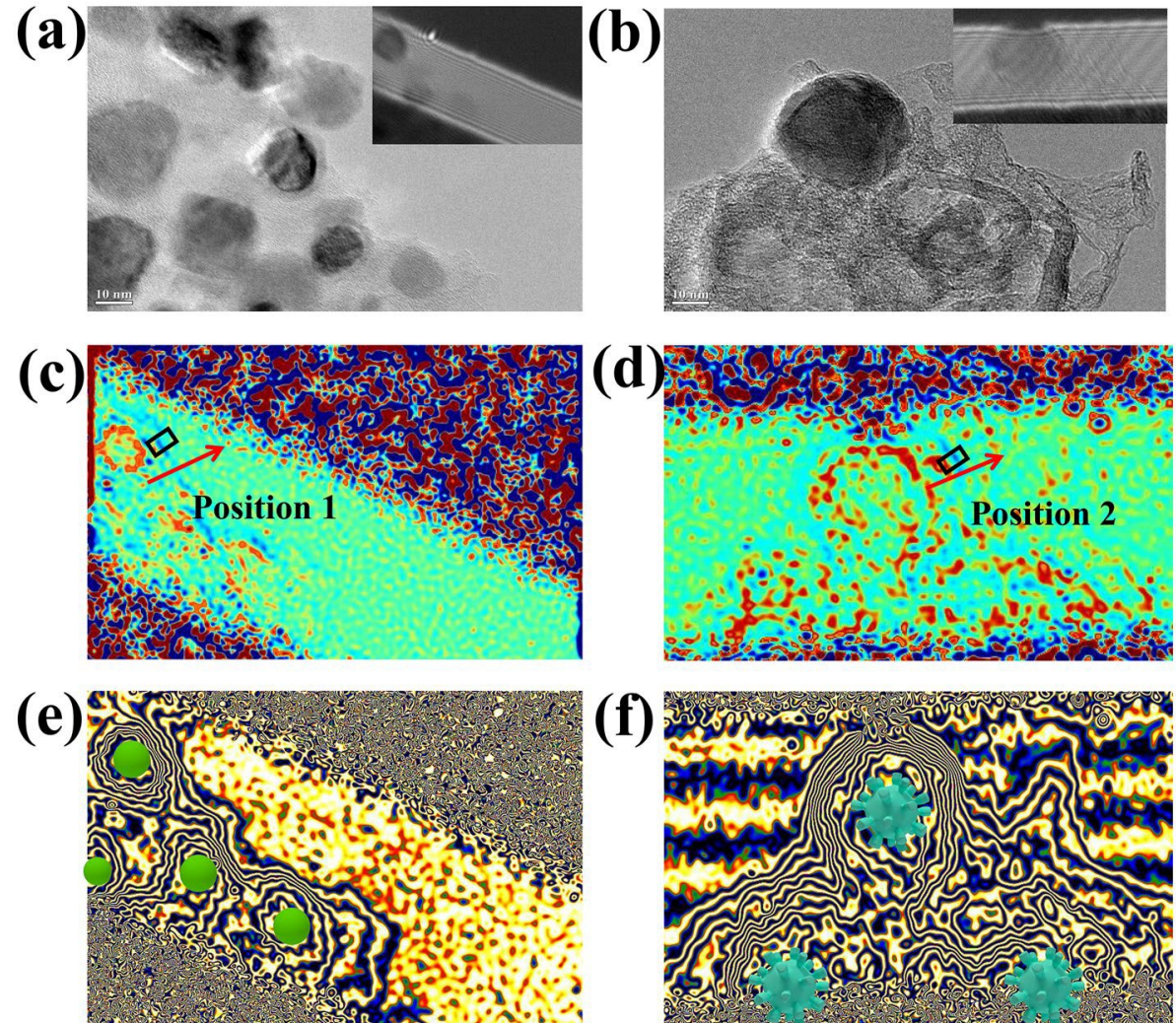
Schema che mostra il meccanismo EMWA di FeCo/Fe₃O₄/NC-600.

Perdite da Polarizzazione:

- Alta temperatura di calcinazione → interfacce eterogenee e accumuli di cariche opposte (carbonio (+); particelle magnetiche (-)) → capacità micro-interfacciali → **perdite da polarizzazione ↑ e performance EMWA ↑**. (c-d)

Strutture Magnetiche:

- Nanoparticelle di FeCo:** struttura a vortice magnetico lineare e rete magnetica densa → accoppiamento tra particelle. (e)
- FeCo/Fe₃O₄/NC-600:** linee di induzione magnetica formano semicirconferenze ampie grazie al forte accoppiamento magnetico tra FeCo e Fe₃O₄. (f)
- Fe₃O₄:** riduce coercitività, migliora **permeabilità** (risposta magnetica maggiore di FeCo) → maggiori perdite per rilassamento (accoppiamento FeCo) e per isteresi.



a, b Immagini TEM ed ologrammi, **c, d** mappe di densità di carica, **e, f** linee magnetiche di flusso corrispondenti di FeCo/NC-700, e FeCo/Fe₃O₄/NC-600, rispettivamente.

Perdite Magnetiche:

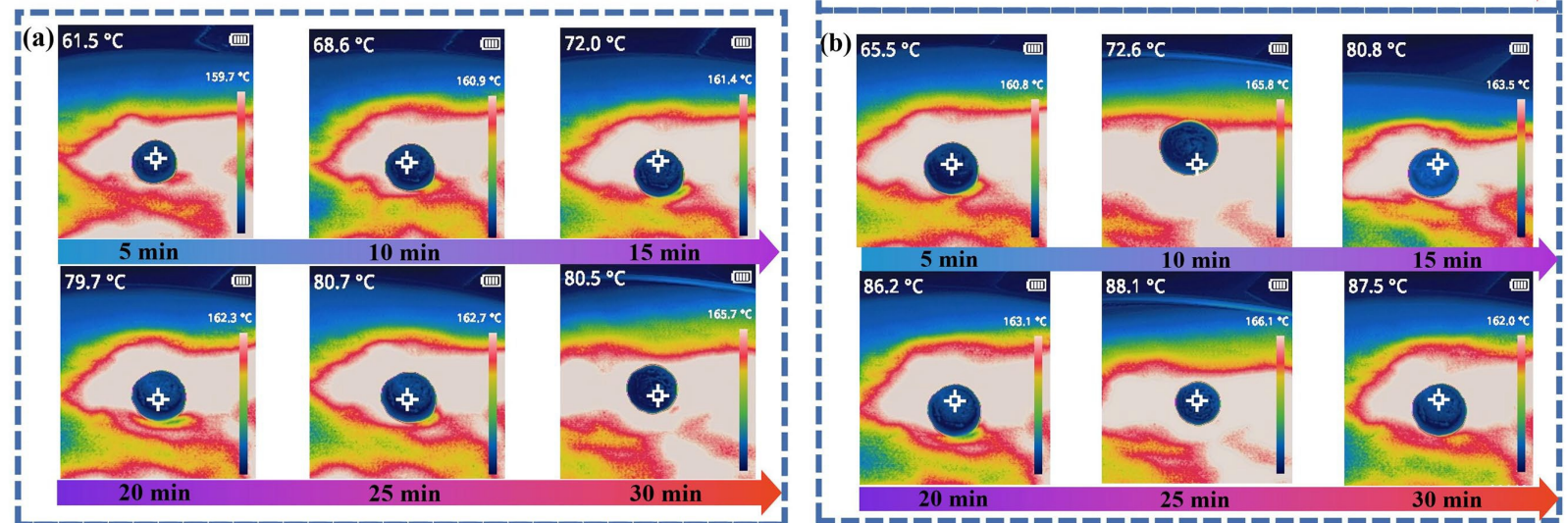
- **Risonanza ferromagnetica e correnti parassite:** fluttuazioni limitate del coefficiente delle perdite parassite (C_0) nell'intervallo **6–14 GHz**.
- Aerogel NC con **basso grado di grafitizzazione** → limitano l'aggregazione delle particelle magnetiche ed interrompono le correnti parassite → sopprimono effetto pelle → sviluppano a pieno le funzioni magnetiche di **Fe_3O_4** e **FeCo**.
- Fluttuazioni di C_0 tra **2–6 GHz** e **14–18 GHz**: legate rispettivamente a **risonanza naturale** (alta anisotropia magnetica) e **risonanza di scambio**.

Caratteristiche Strutturali e Funzionalità:

- **Geometria a virus ($\text{FeCo}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{NC-600}$):** punte nanometriche simili ad antenne → aumentano assorbimento e trasmissione EMWs → ampliano la rete magnetica (da nm a cm) e migliorando le perdite EMW (lunghezze d'onda centimetriche).
- **Struttura elicoidale del CP:** **polarizzazione incrociata**, ulteriori perdite elettromagnetiche.

Trasferimento del Calore:

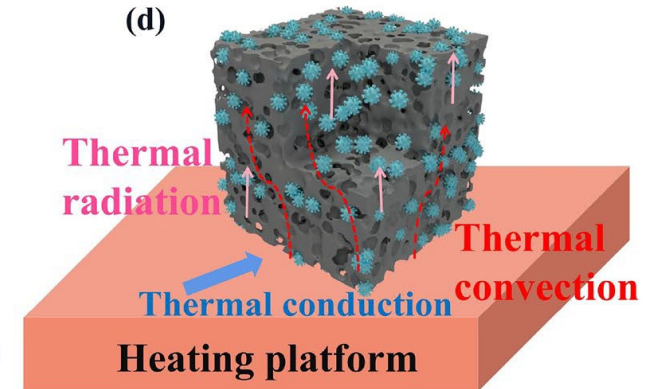
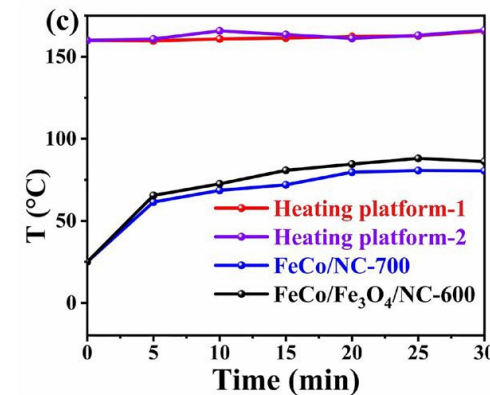
- **Conduzione termica:** Rallentata dalla struttura altamente porosa degli aerogel.
- **Convezione termica:** Ridotta dai percorsi tortuosi per il flusso d'aria.
- **Radiazione termica:** Dissipata tramite riflessione e dispersione all'interfaccia solido-gas.



Immagini termiche ad infrarossi di **a** FeCo/NC-700 e **b** FeCo/Fe₃O₄/NC-600 a 180 °C; **c** curva di variazione di temperatura; **d** schema del meccanismo di trasferimento di calore dei campioni.

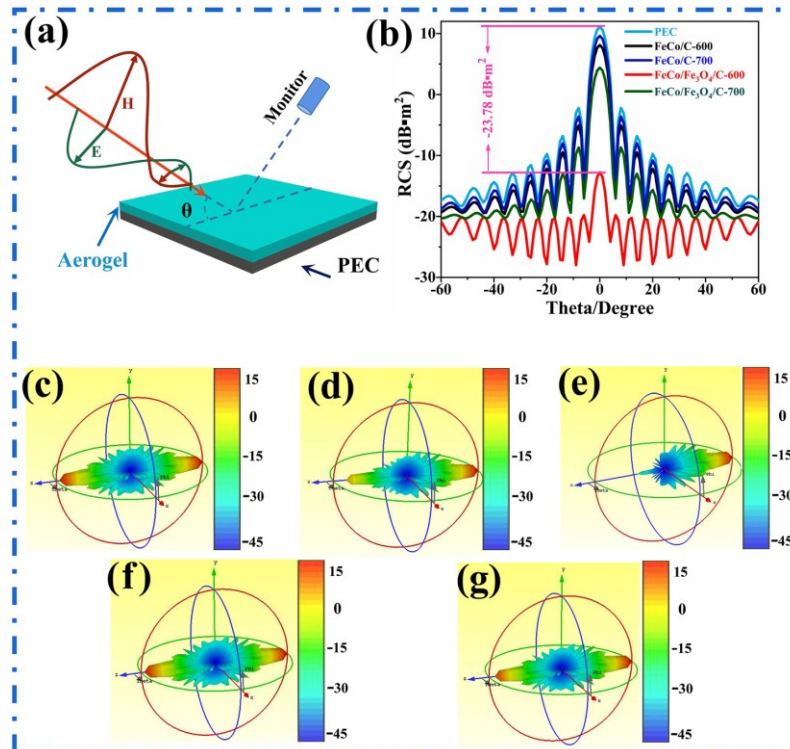
Isolamento Termico:

- **Conduttività termica:** FeCo/NC-700: 0,043 W m⁻¹ K⁻¹; FeCo/Fe₃O₄/NC-600: 0,049 W m⁻¹ K⁻¹.
- **Test piattaforma riscaldante (180 °C, durata 5 min):** Temperatura cresce rapidamente nei primi 5 minuti (stabile dopo 25 min circa) → **FeCo/NC-700 (maggiore porosità):** ~80,9 °C; **FeCo/Fe₃O₄/NC-600:** ~87,5 °C.



Simulazione RCS di Modelli Rivestiti:

- Modello **conduttore elettrico perfetto (PEC)** rivestito con 2,44 mm di aerogel. EMW = 7,52 GHz. **Angolo di incidenza (θ)** tra -90° e 90° .
- FeCo/Fe₃O₄/NC-600 vs PEC: $\Delta = -23,78 \text{ dB m}^2$ ($\theta = 0^\circ$, EMW perpendicolari). RCS inferiore rispetto a PEC.

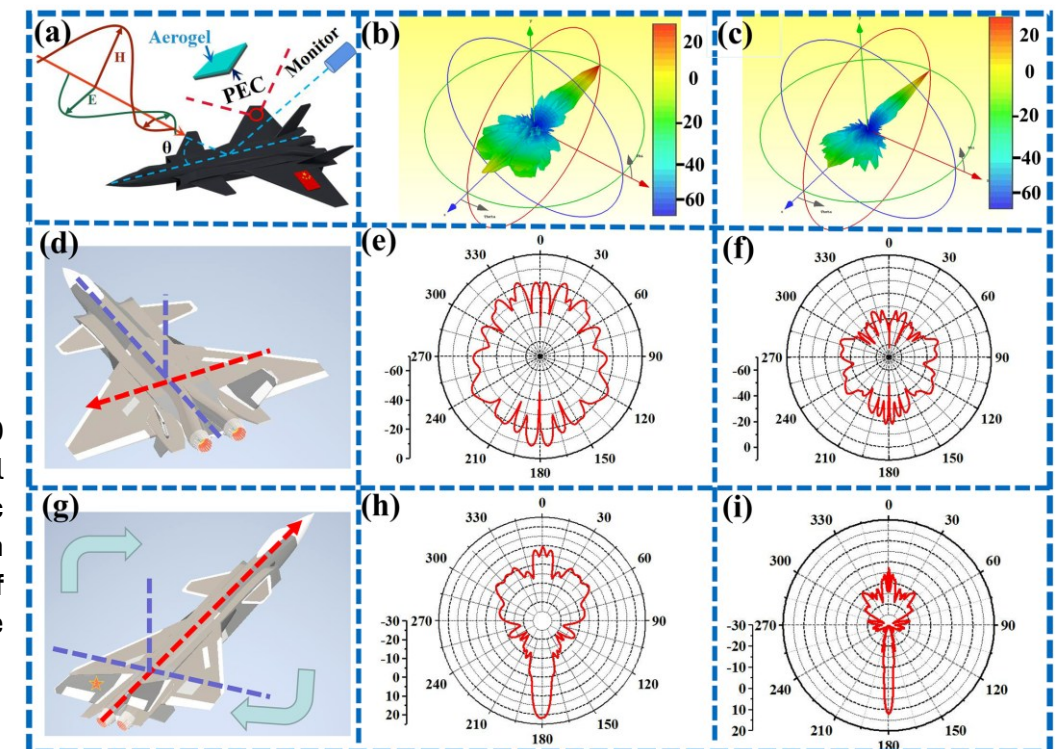


← **a** Simulazione CST, **b** Curve RCS per modelli di forma squadrata, e risultati 3D RCS per modelli di forma squadrata rivestiti con **c** PEC **d** FeCo/NC-600, **e** FeCo/NC-700, **f** FeCo/Fe₃O₄/NC-600, e **g** FeCo/Fe₃O₄/NC-700.

a Simulazione CST del caccia J-20 rivestito con aerogel, RCS 3D del caccia J-20 rivestito con **b** PEC, e **c** FeCo/Fe₃O₄/NC-600, RCS del caccia J-20 rivestito con **d-f** FeCo/Fe₃O₄/NC-600 lateralmente, e **g-i** longitudinalmente. →

Test Modello J-20:

- FeCo/Fe₃O₄/NC-600 di 2,44 mm su caccia J-20 (PEC). EMW = 7,52 GHz.
- RCS inferiore a (PEC), sia lateralmente che longitudinalmente, particolare efficacia sulle ali.**



INNOVAZIONI:

- **Aerogel Magnetici NC:** Primo sviluppo di due tipi di aerogel magnetici NC utilizzando **MOG** come precursori. Particelle magnetiche uniformemente disperse nella matrice NC degli aerogel.
- **Effetti Sinergici:** Doping di azoto e incorporazione di FeCo e Fe_3O_4 nella matrice NC migliorano l'attenuazione delle onde elettromagnetiche (EMW).
- I **MOG** rappresentano una nuova via per la preparazione di aerogel ibridi leggeri, uniformi e stabili da cui si ottengono materiali con isolamento termico, prestazioni EMWA e invisibilità radar avanzate.

Campione	Temperatura Pirolisi (°C)	Velocità di Riscaldamento (°C/min)	Picco di Riflessione (RLmin)	Banda Efficace (fe a spessore)	Temp. di Stabilizzazione (piastra a 180°C)
FeCo/NC-700 (Campione per assorbimento massimo)	700 °C	2 °C/min	-85,0 dB a 2,90 mm (Assorbimento >99,999999%)	5,52 GHz a 2,10 mm	~80,9 °C (Minima)
FeCo/Fe₃O₄/NC-600 (Campione per banda larga)	600 °C	5 °C/min	-60,5 dB a 2,44 mm (Assorbimento >99,9999%)	7,44 GHz a 1,59 mm (Spessore minimo)	~87,5 °C

- Metal–Organic Gel Leading to Customized Magnetic-Coupling Engineering in Carbon Aerogels for Excellent Radar Stealth and Thermal Insulation Performances (fonte principale).
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-023-01255-7>
- Supporting information fonte principale.
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/instance/10695913/bin/40820_2023_1255_MOESM1_ESM.pdf (allegato 1)
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/instance/10695913/bin/40820_2023_1255_MOESM2_ESM.mp4 (allegato 2)
- Stealth, significato ed etimologia, Vocabolario Treccani (slide 2).
<https://www.treccani.it/vocabolario/stealth/>
- Integrated review of stealth technology and its role in airpower, Arvind Gangoli Rao, Shripad P. Mahulikar (slide 2).
https://www.researchgate.net/publication/287536552_Integrated_review_of_stealth_technology_and_its_role_in_airpower
- Il Blackjack Типолев Ту-160М2 (Tu-160M2) ha effettuato il primo volo con i nuovi motori Turbofan di serie NK-32-02 (slide 2).
<https://svppbellum.blogspot.com/2021/06/il-blackjack-160m2-tu-160m2-ha.html>
- Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies, Konstantinos Zikidis (slide 2).
https://www.researchgate.net/publication/259503614_Low_Observable_Principles_Stealth_Aircraft_and_Anti-Stealth_Technologies
- Joint improvements of radar/infrared stealth for exhaust system of unmanned aircraft based on sorting factor Pareto solution (foto slide 2).
<https://www.nature.com/articles/s41598-021-87756-0>
- Lockheed Martin (foto slide 2).
<https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-22.html>
- russianplanes.net (foto slide 2).
<http://russianplanes.net/EN/ID52033>
- Wikimedia Commons (foto slide 2).
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16170721> ; <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=122396445> ;
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5215015> ; <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3770855>
- U.S. Department of War (foto slide finale).
<https://media.defense.gov/2009/Jan/29/2000633062/-1/-1/0/090123-F-2828D-942.JPG>



GRAZIE

