

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Relazione per la prova finale
«Studio su metodi di produzione di
materiali di livellamento di campo
(FGM)»***

Tutor universitario: Prof. Marconato Nicolò

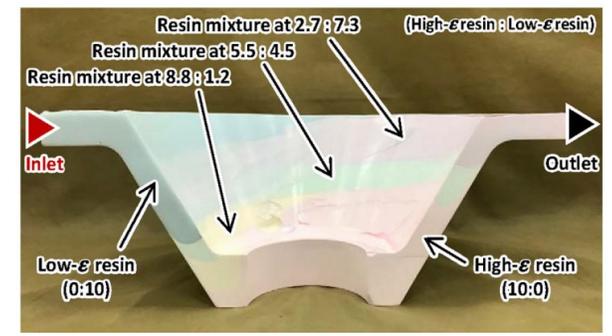
Laureando: *Crimi Fabio*

Padova, 18/09/2024

I materiali di livellamento di campo (FGM) appartengono alla classe dei "functionally graded materials": sono, infatti, particolari isolatori progettati in modo da ottenere un gradiente di permittività (ϵ) o conducibilità elettrica (σ) al fine di omogeneizzare la distribuzione del campo elettrico in cui sono immersi e aumentare la rigidità dielettrica.

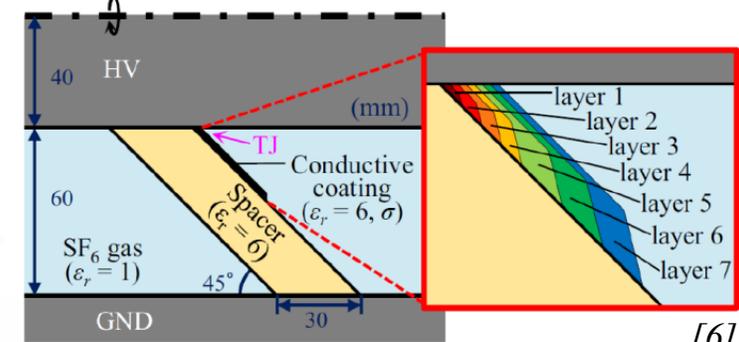
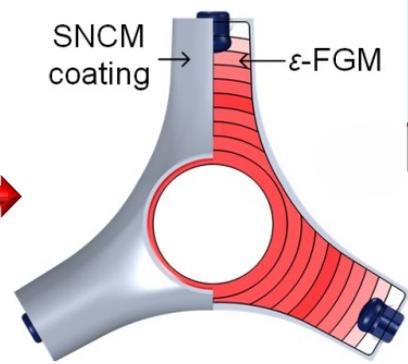
Possono essere divisi in due categorie:

- **bulk-FGM**: gradiente di ϵ o σ esteso su tutto il volume



[1]

- **surface-FGM**: gradiente di ϵ o σ limitato sulla superficie



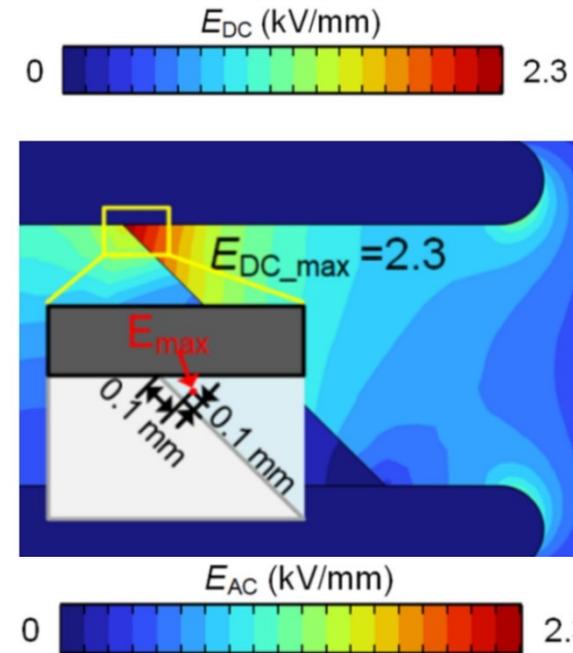
[6]

Dalla cui unione derivano i **multi-dimensional FGM**



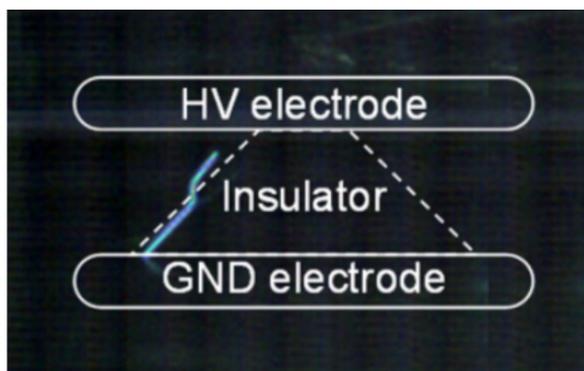
[7]

- Proporre alcuni metodi per la produzione di FGM
- Evidenziarne gli effetti isolanti in confronto agli isolatori convenzionali
- Discutere gli eventuali aspetti negativi
- Proporre alcune azioni per favorirne la diffusione

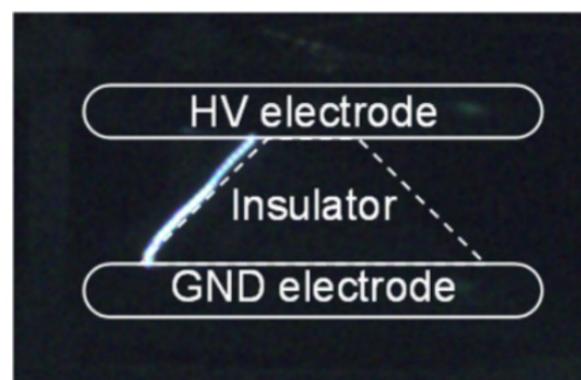


Distribuzione del campo elettrico in un isolatore convenzionale sotto tensione continua (DC) [4].

Distribuzione del campo elettrico in un isolatore convenzionale sotto tensione alternata (AC) [4].

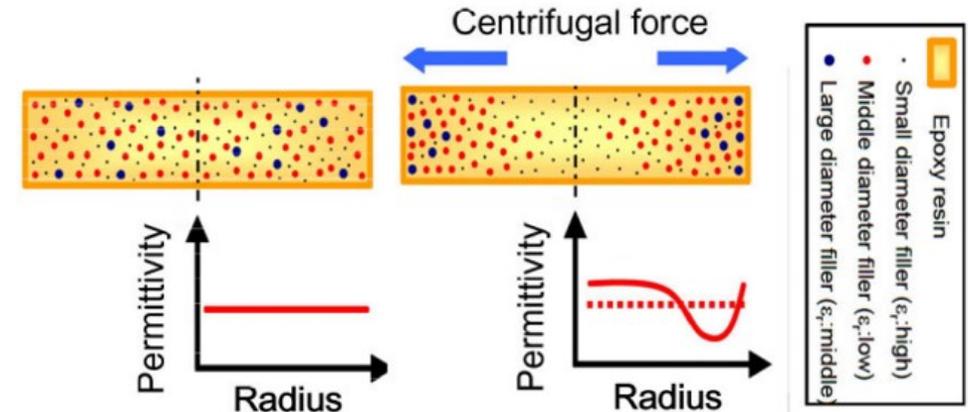


Tipico percorso di scarica in un isolatore convenzionale sotto DC [4].

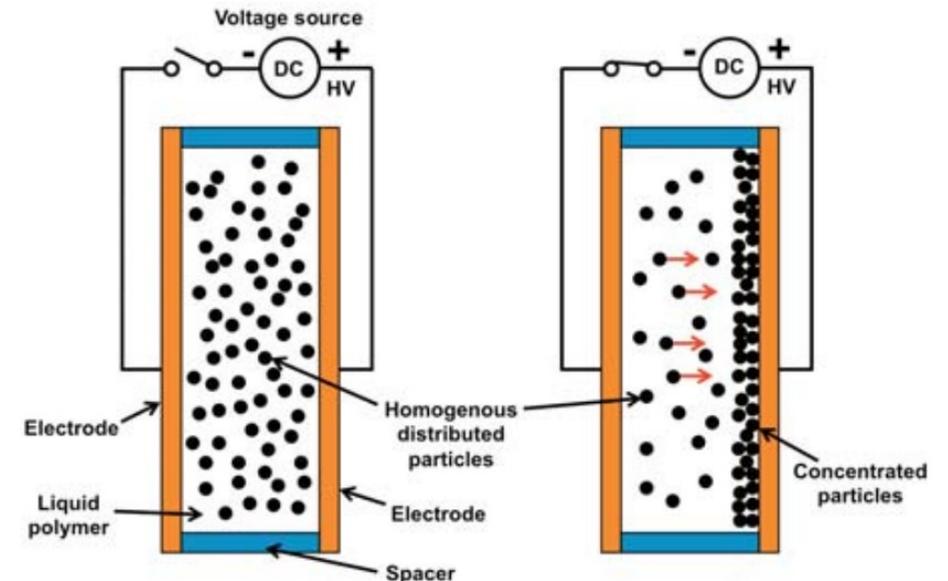


Tipico percorso di scarica in un isolatore convenzionale sotto AC [4].

- ϵ -FGM
- Procedimenti descritti:
 1. metodo centrifugo;
 2. metodo di colata in miscela flessibile (FMC);
 3. metodo di versamento strato per strato;
 4. metodo dell'elettroforesi;
 5. metodo di laminazione.
- Materiali utilizzati:
 - resina epossidica come matrice;
 - TiO_2 , SiO_2 , $SrTiO_3$, $H - SiO_2$ e Al_2O_3 come particelle di rinforzo caratterizzate da diversa ϵ_r .



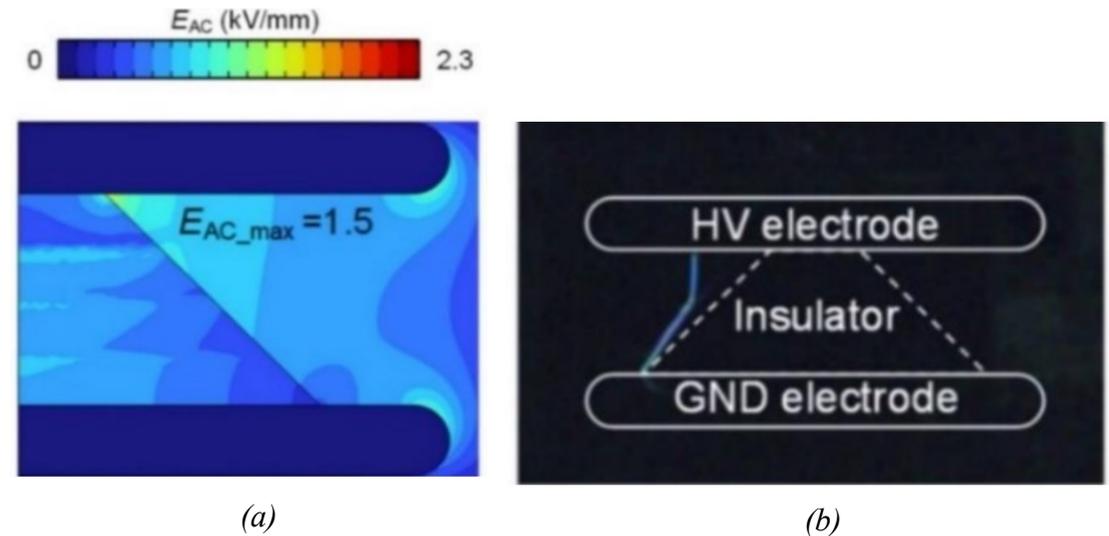
Rappresentazione dell'effetto del metodo centrifugo nella disposizione delle particelle di rinforzo e variazione del gradiente di permittività negli U-FGM [9].



Principio di funzionamento del processo di elettroforesi [12].

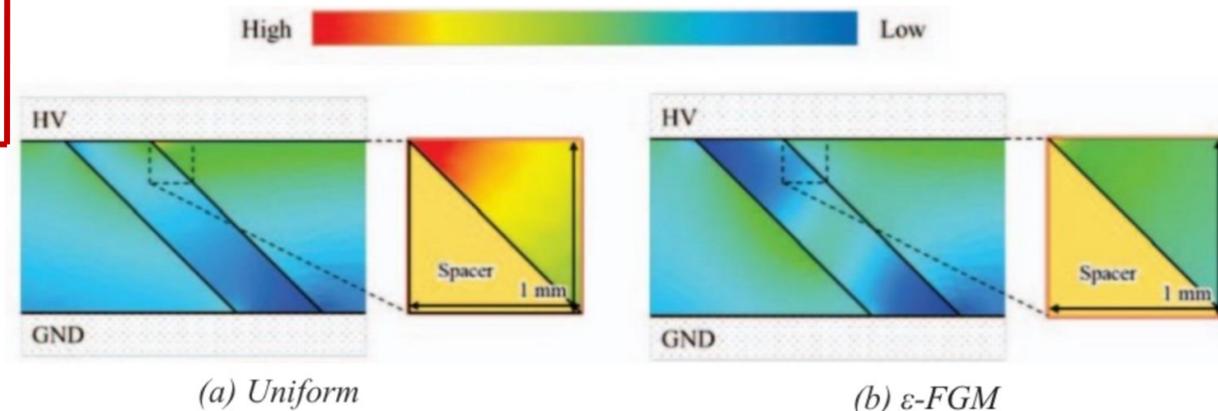
- Risultati:
 - omogeneizzazione di E ;
 - riduzione E_{max} , dal 12% con il m. centrifugo fino al 64% con il FMC;
 - aumento tensione di scarica (t.d.s.), fino al 70% con il m. dell'elettroforesi;
 - percorso di scarica non più in prossimità del punto triplo.

- Problematiche:
 - problemi di interfaccia (FMC; laminazione);
 - peggioramento delle proprietà meccaniche e termiche (centrifugo; elettroforesi; laminazione).



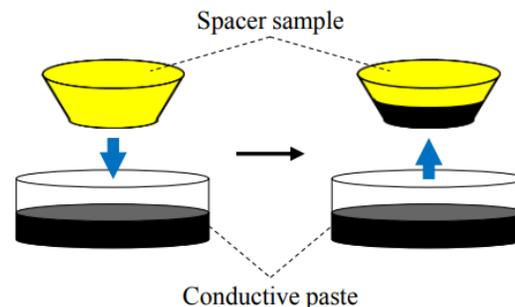
(a) Distribuzione del campo elettrico e (b) tipico percorso di scarica nel metodo di versamento strato per strato sotto AC [4].

Distribuzione del campo elettrico intorno gli isolatori nel caso di (a) ϵ_r uniforme e (b) ϵ -FGM prodotti con il FMC [10].

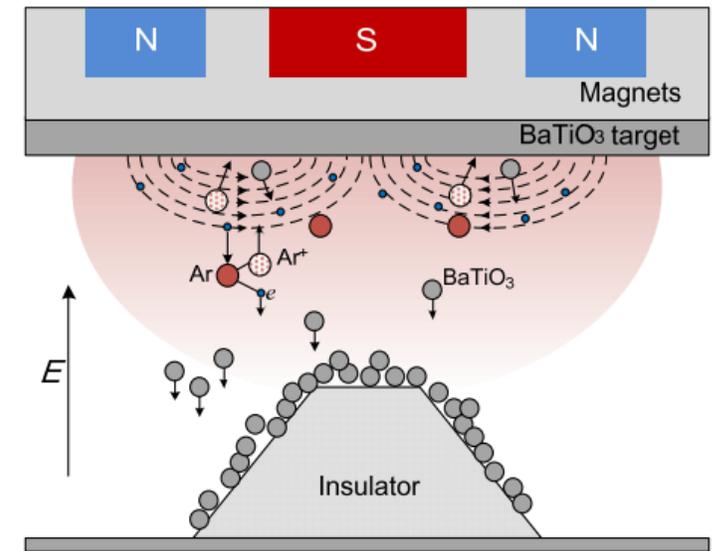


- SFGM caratterizzati da gradiente di σ
- Procedimenti descritti:
 1. metodo di rivestimento per immersione;
 2. metodo di polverizzazione catodica magnetica;
 3. metodo di fluorurazione a gradiente;
 4. metodo spray ad aria.
- Materiali utilizzati:
 - corpo di resina epossidica e particelle di Al_2O_3 ;
 - Fe_3O_4 , SiC e $BaTiO_3$ come particelle di rinforzo caratterizzate da diversa σ ;
 - diluenti, indurenti e agenti curanti.

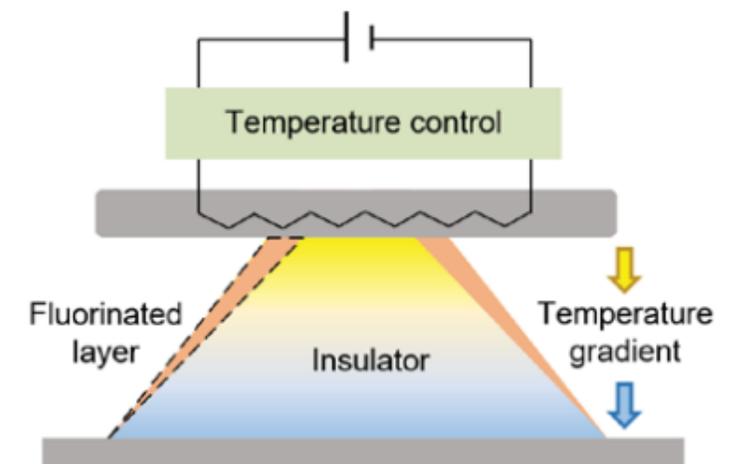
Schematizzazione del metodo di rivestimento per immersione [14].



Rappresentazione del principio di funzionamento del metodo di polverizzazione catodica magnetica [15].

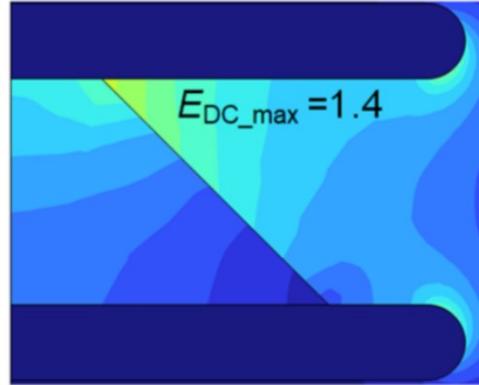
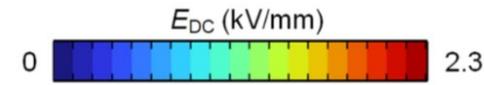


Schematizzazione del metodo di fluorurazione a gradiente [16].

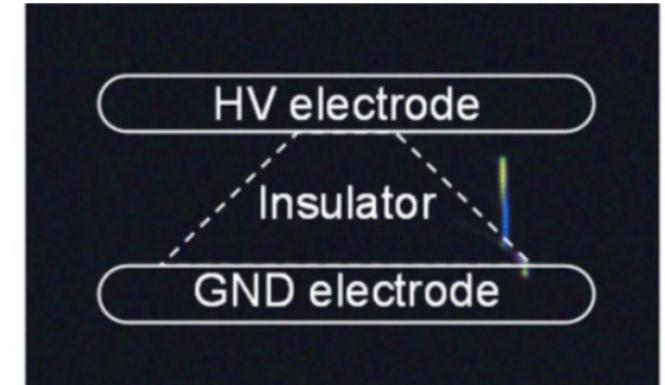


- Risultati:
 - omogeneizzazione di E ;
 - riduzione E_{max} , fino al 70% con il m. di polverizzazione catodica magnetica;
 - aumento tensione di scarica, fino al 33% con il m. di fluorurazione a gradiente;
 - percorso di scarica non più in prossimità del punto triplo.

- Problematiche:
 - perdite di conduzione elettrica;
 - instabilità interfaccia strato-isolatore;
 - relazione $\sigma - t_{fluorurazione} - T_{fluorurazione}$ complicata (m. di fluorurazione).

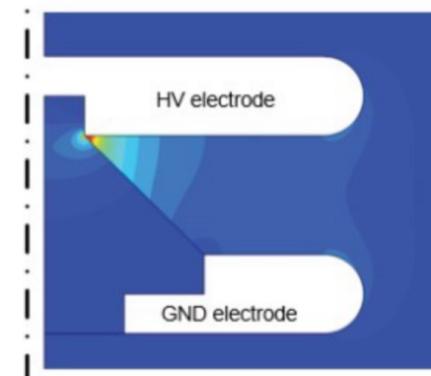
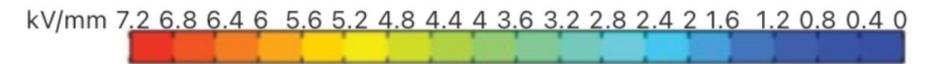


(a)

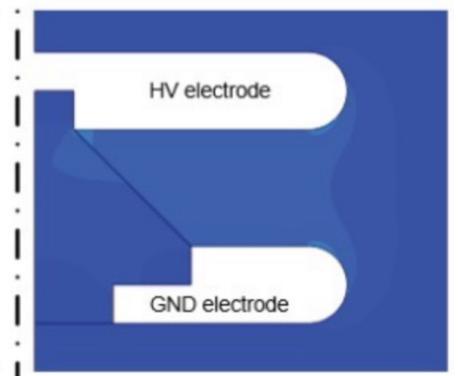


(b)

(a) Distribuzione del campo elettrico e (b) tipico percorso di scarica nel metodo spray ad aria sotto DC [4].



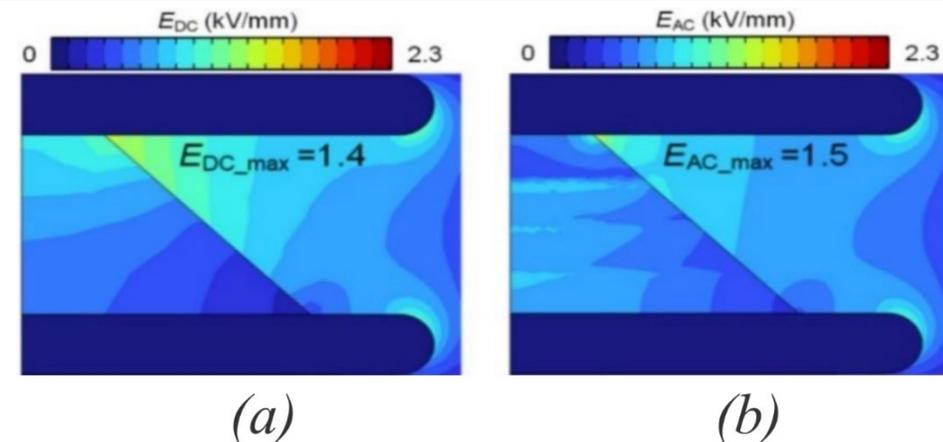
(a) Original insulator



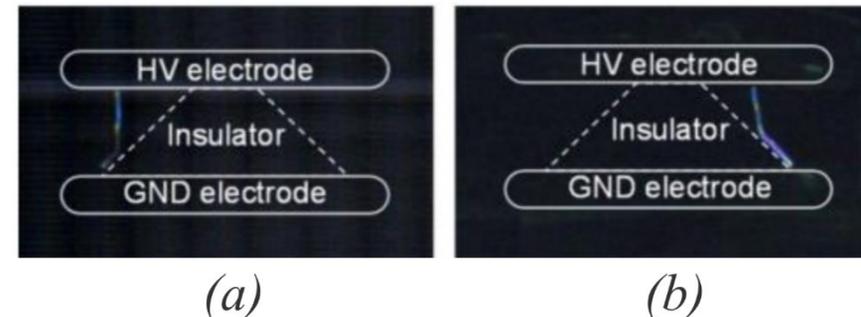
(b) Insulator with SFGM

Distribuzione del campo elettrico sotto DC in (a) un isolatore convenzionale e in (b) un SFGM prodotto con il metodo di fluorurazione a gradiente [16].

- Si ottengono dal rivestimento di un ϵ -FGM con uno dei metodi utilizzati per la produzione di surface-FGM.
- Produzione di isolatori aventi le proprietà combinate dei ϵ -FGM e surface-FGM:
 - ϵ -FGM prodotto con metodo spray ad aria;
 - surface-FGM prodotto con metodo di versamento strato per strato.
- **Risultati:**
 - riduzione E_{max} del 39.1% in DC;
 - aumento t.d.s. del 27.2% in DC;
 - riduzione E_{max} del 37.5% in AC;
 - aumento t.d.s. del 17.5% in AC.
- **Vantaggi/Svantaggi:**
 - isolamento migliorato sia in DC che AC;
 - costo.

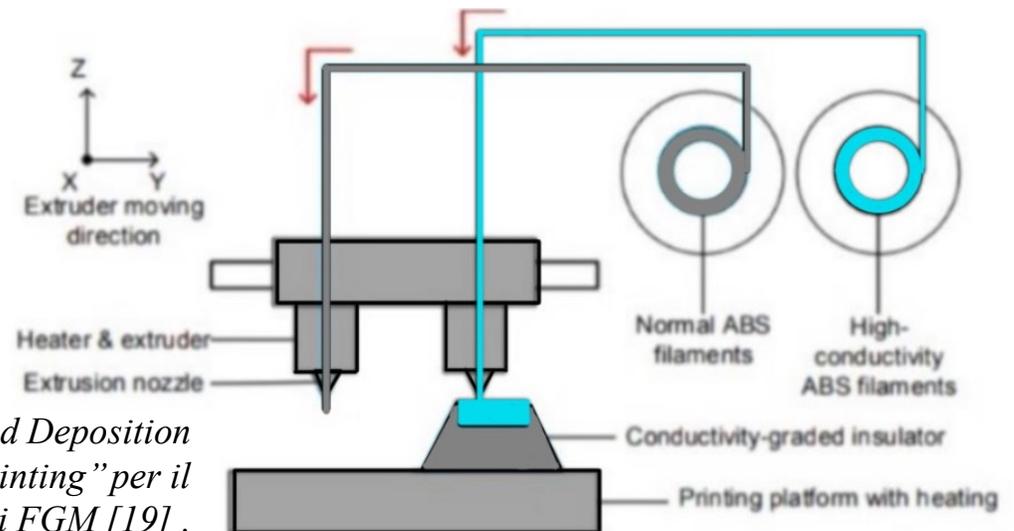


Distribuzione del campo elettrico in un isolatore MFGM sotto (a) DC e (b) AC [4].



Tipico percorso di scarica in un isolatore MFGM sotto (a) DC e (b) AC [4].

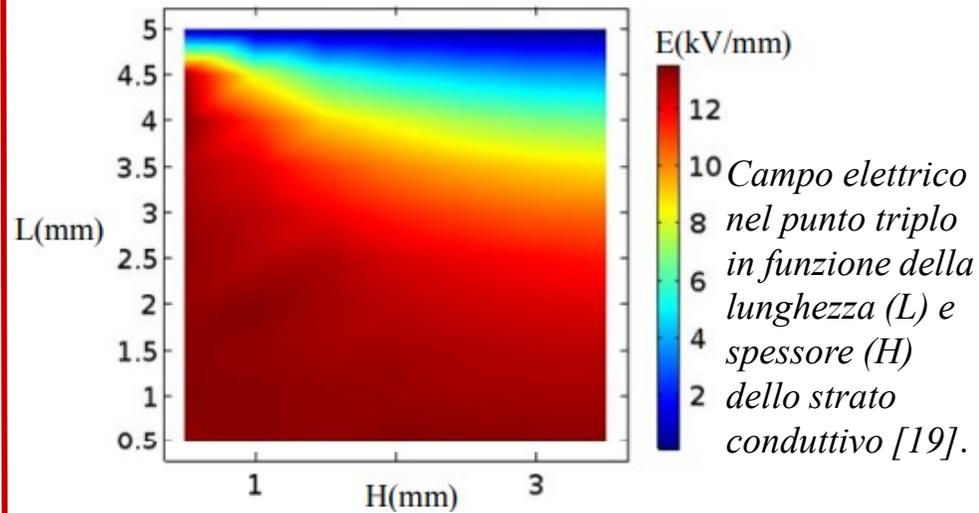
- “Near net shape manufacturing process”
- Processo di produzione:
 1. rappresentazione geometrica mediante progettazione assistita al computer (CAD);
 2. scomposizione in fette del modello;
 3. conversione nel formato file di linguaggio di tassellatura standard (STL);
 4. generazione del supporto;
 5. fabbricazione;
 6. trattamenti finali post-produzione.



Rappresentazione del “Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing” per il stampaggio 3D di isolatori FGM [19].

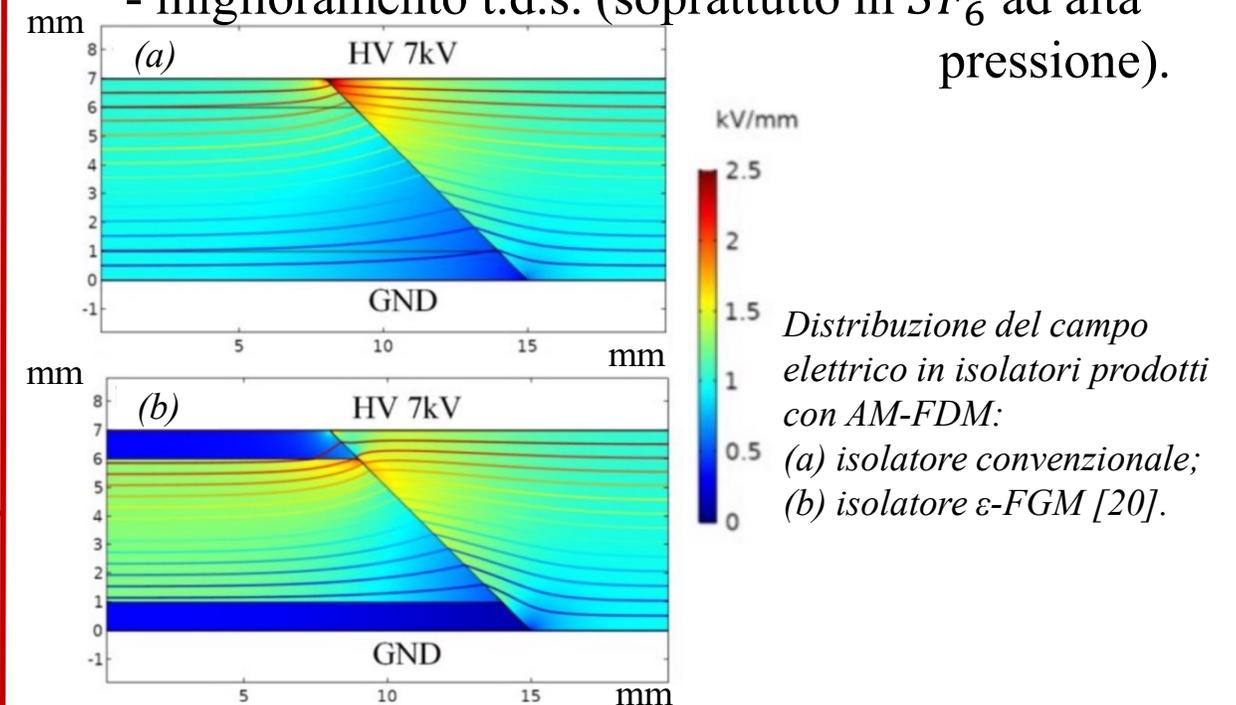
Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing

- Produzione di surface-FGM con gradiente di σ :
 - Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS);
 - ABS rinforzato con carbonio nero.
- Due ugelli separati
- Risultati:**
 - riduzione E_{max} del 60%.

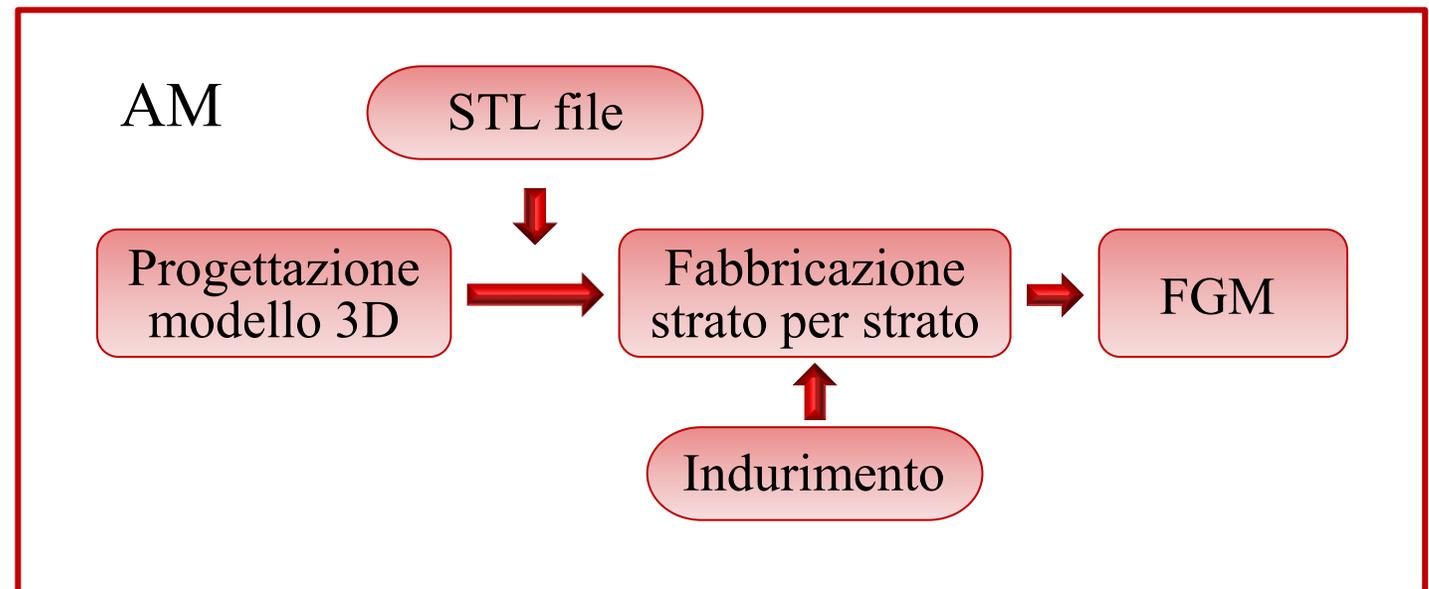
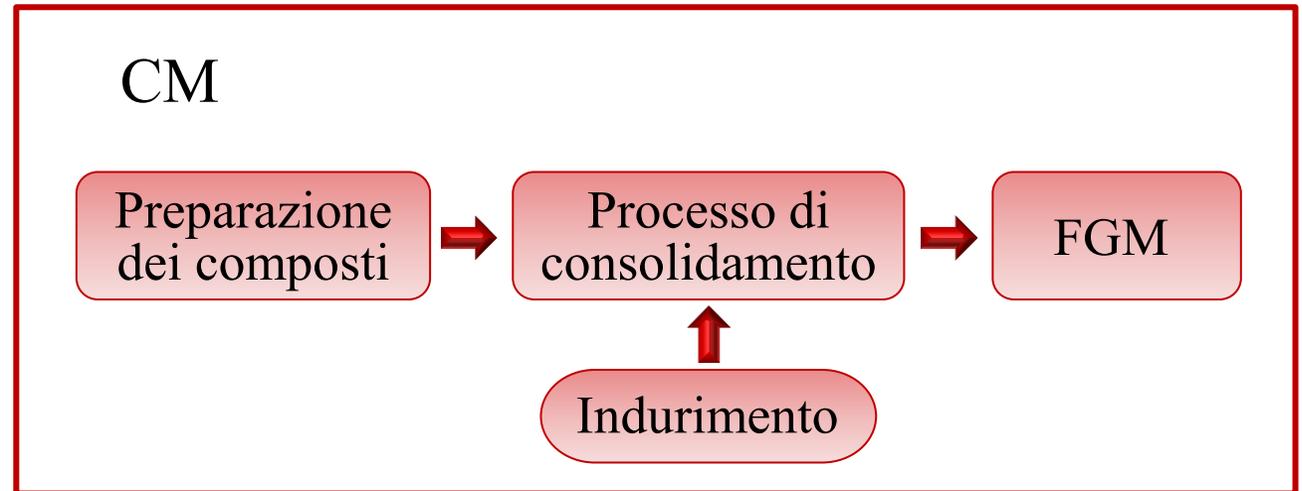


Active-Mixing Fused Deposition Modeling (AM-FDM)

- Produzione di bulk-FGM con gradiente di ϵ :
 - acido polilattico (PLA);
 - TiO_2 , Al_2O_3 e $SrTiO_3$ come particelle di rinforzo.
- Unico ugello \rightarrow gradiente continuo
- Risultati:**
 - notevole riduzione di E_{max} ;
 - miglioramento t.d.s. (soprattutto in SF_6 ad alta pressione).



- Forma
- Modulazione dei gradienti
- Costo
- Tempo di produzione
- Possibile presenza di difetti

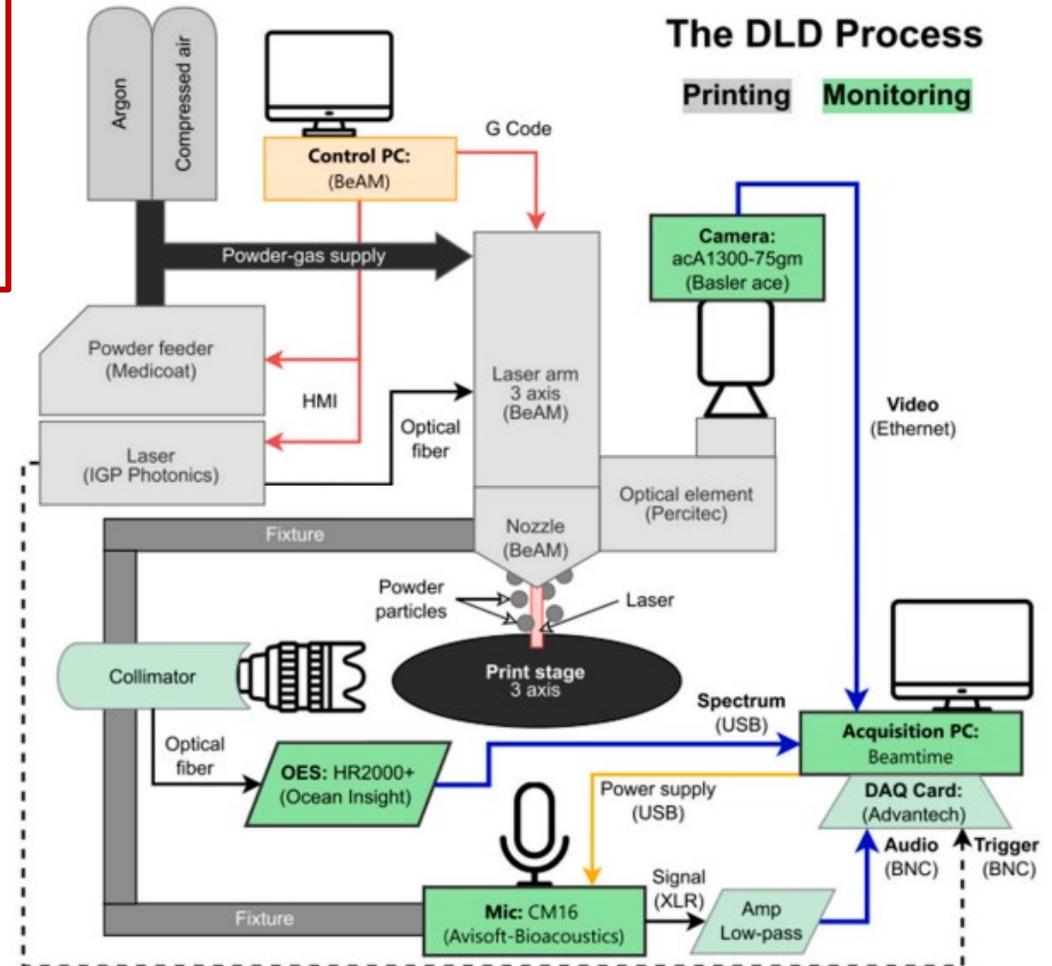


- Implementazione dell'Intelligenza Artificiale (AI)
- Sviluppo di nuovi software per la progettazione e simulazione
- Standardizzazione (ASTM international, ISO, CEN)



Riduzione costi e
diffusione competitiva

Implementazione dell'AI durante il processo di produzione di FGM mediante la "Deposizione Laser Diretta" (DLD) [17].



Rispetto ai tradizionali isolatori, si riscontrano:

- ottime prestazioni di isolamento sotto sia DC, sia AC, sia tensioni combinate;
- possibilità di realizzare qualsiasi forma con l'AM;
- instabilità di interfaccia;
- peggioramento proprietà meccaniche e/o termiche.

Vantaggi

Svantaggi

Ulteriori sviluppi e ricerche mirate su:

- software di progettazione e simulazione
- prevenzione di difetti
- riduzione dei costi

possono portare alla diffusione di questi materiali.

- [1] J. Li, H. Liang, Y. Chen, B. Du, "Promising functional graded materials for compact gaseous insulated switchgears/pipelines", *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 5, n. 3, pp. 231-240, 2020.
- [2] G. Ronciglia, "Manipolazione responsabile dell'esafluoruro di zolfo (SF6)", WIKI, [Online]. Available: <https://blog.wika.it/knowhow/manipolazione-responsabile-dellesafluoruro-di-zolfo-sf6/>. [Consultato il giorno 4 Agosto 2024].
- [3] M. S. Charan, A. K. Naik, N. Kota, T. Laha, S. Roy, "Review on developments of bulk functionally graded composite materials", *International materials reviews*, vol. 67, n. 8, pp. 797-863, 2022.
- [4] J. Dong, B. Du, H. Liang, H. Yao, "Multi-dimensional functionally graded insulator for HVDC compact gas insulated apparatus", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 56, pp. 1-9, 2023.
- [5] B. X. Du, Z. Y. Ran, J. Li, H. C. Liang, "Novel Insulator with Interfacial σ -FGM for DC Compact Gaseous Insulated Pipeline", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, n. 3, pp. 818-825, 2019.
- [6] R. Oishi, H. Kojima, K. Kato, N. Hayakawa, "Electric Field Relaxation Effect of Functionally Graded Materials (FGM) with Conductive Multilayer Coating", in *2017 IEEE conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, Fort Worth, TX, USA, pp. 46-49, 2017.
- [7] J. Dong, B. Du, H. Liang, H. Yao, "Parameter Design of Functionally Graded Materials for Tri-Post Insulator in HVDC GIL Under Stationary and Transient Conditions", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 30, n. 2, pp. 752-759, 2023.
- [8] M. Kurimoto, K. Kato, H. Adachi, S. Sakuma, H. Okubo, "Fabrication and Experimental Verification of Permittivity Graded Solid Spacer for GIS", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Cancun, Mexico, pp. 789-792, 2002.
- [9] N. Hayakawa, J. Shimomura, T. Nakano, M. Hanai, K. Kato, H. Okubo, "Fabrication Technique of Permittivity Graded Materials (FGM) for Disk-Type Solid Insulation", *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Montreal, QC, Canada, pp. 32-35, 2012.
- [10] N. Hayakawa, Y. Miyaji, H. Kojima, "Simulation on discharge inception voltage improvement of GIS spacer with permittivity graded materials (ϵ -FGM) using flexible mixture casting method", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, n. 4, pp. 1318-1323, 2018.
- [11] S. Diahm, Z. Valdez-Nava, L. Lévêque, T. T. Le, L. Laudebat, T. Lebey, "Field Grading Composites Tailored by Electrophoresis - Part 1: Principle and Permittivity Gradient in Uniform Electric Field", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, n. 2, pp. 333-339, 2021.

- [12] S. Diahm, Z. V. Nava, L. Lévêque, T. T. Le, L. Laudebat, T. Lebey “An Original in-situ way to build field grading materials (FGM) with permittivity gradient using electrophoresis”, *IEEE Conference on Dielectrics (ICD)*, Budapest, Hungary, pp. 1010-1013, 2018.
- [13] S. Watanabe, N. Hayashi, H. Takeuchi, Y. Uchida, D. Dykes, G. Touchard, M. Ieda, “Electrical applications of titanium-based FGMs manufactured by progressive lamination”, *IEEE International Conference of Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Vastera, Sweden, pp. 539-542, 1998.
- [14] Y. Miyaji, H. Kojima, K. Kato, N. Hayakawa, “Fabrication and Evaluation of Permittivity Graded Materials with SrTiO₃ Particles and Localized Conductive Layer”, *IEEE International Conference*, Chengdu, China, pp. 631-634, 2016.
- [15] B. X. Du, Z. H. Wang, H. C. Liang, “Epoxy Insulator with Surface Graded-permittivity by Magnetron Sputtering for Gas-insulated Lines”, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, n. 1, pp. 197-204, 2020.
- [16] Z. Y. Ran, B. X. Du, J. Li, H. Yao, J. W. Xing, J. N. Dong, “Flashover Improvement and Field Control of Insulator with Surface σ -FGM for DC GIL”, *2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD)*, Valencia, Spain, pp. 309-312, 2020.
- [17] S. Alkunte, I. Fidan, V. Naikwadi, S. Gudavasov, M. A. Ali, M. Mahmudov, S. Hasanov, M. Cheepu, “Advancements and Challenges in Additively Manufactured Functionally Graded Materials: A Comprehensive Review”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, n. 23, pp. 1-37, 2024.
- [18] Y. Li, Z. Feng, L. Hao, L. Huang, C. Xin, Y. Wang, E. Bilotti, K. Essa, H. Zhang, Z. Li, F. Yan, T. Peijs, “A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: From Multi-Scale Design to Versatile Functional Properties”, *Advanced Materials Technologies*, vol. 5, n. 4, pp. 1-32, 29 Aprile 2020.
- [19] Z. Liu, W. Li, L. Zhang, X. Li, J. Deng, G. Zhang, “Simulation Design and 3D-Printing Fabrication of Conductivity Graded Insulator”, in *1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, Xi'an, China, 2017.
- [20] W. Li, J. Zhao, Y. Chen, Y. Wei, Z. Jiang, C. Wang, H. Lan, J. Deng, G. Zhang, “Surface Insulation Performance of 3D Printed Functionally Graded Insulator Fabricated by Active-Mixing Fused Deposition Modeling (AM-FDM)”, in *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Beijing, China, 2020.
- [21] W. J. Monzel, B. W. Hoff, S. S. Maestas, D. M. French, S. C. Hayden, “Dielectric breakdown of additively manufactured polymeric materials”, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, n. 6, pp. 3543-3549, 2015.