

Research project:

New wireless technologies, such as 5G and beyond-5G communication systems, are rapidly expanding their fields of application (e.g. Internet of Things, Industry 4.0 and Smart Environments and Cities), offering concrete economic opportunities for society. [1] These technologies must meet highly stringent performance requirements, ranging from ultra-high reliability to near-zero latency and interference resilience. [2] These requirements are even more challenging when faced with the increasingly complex and highly dynamic environments in which wireless systems are designed to operate. [3] On this basis, it is of fundamental importance to adopt electromagnetic reconfigurability strategies, which allow the functionalities of the devices involved in wireless communication systems to be adapted in real time in response to different environmental and operational conditions. [4]

In this scenario, the use of plasma-based metasurfaces appears very promising. A metasurface is a surface capable of controlling the propagation of electromagnetic waves thanks to its peculiar structure composed of a host material and meta-atoms (inclusions) characterized by dimensions and spacing significantly smaller than the wavelength of the incident wave. [5] In the case of a plasma-based metasurface, each meta-atom is made up of a plasma discharge, i.e. a quasi-neutral and electrically conductive ionized gas, composed mainly of electrons, positive and negative ions, photons and reactive species. [6] Given that a plasma discharge represents an extremely reactive environment whose electrical permittivity can be controlled over time by varying the electronic density and collision frequency, the creation of a plasma-based metasurface has the potential in terms of performance and reconfigurability to meet the stringent requirements for new wireless technologies. [7]

The research activity, which will be performed within the frame of the European Project ‘PULSE - Plasma reconfigurable metasurface technologies’ (<https://www.pulse-pathfinder.eu>), is aimed at exploring the feasibility of reconfigurable plasma metasurfaces as 1) tunable lenses for antennas (tunable beam steering using planar metalens for antennas; cylindrical metasurfaces surrounding a dipole; planar metasurfaces for horn or waveguide antenna), 2) non-reciprocal devices (magnet-less non-reciprocal isolator for waveguides) and 3) four-dimensional multiband/wideband metadevices. The research fellow will collaborate with the Research Group for Industrial Applications of Plasma at the University of Bologna and the other Partners of the PULSE project, and is expected to assume a leading role in designing, manufacturing and characterizing plasma metasurfaces.

Plan of activities:

The research project concerns the design, manufacturing and characterization of plasma metasurfaces, exploring the potential of the technology for applications in the telecommunications sector. The project includes two main activities:

- 1) Realization of plasma metasurfaces: the activity involves the design and fabrication of plasma devices based on different architectures/configurations (glow discharge, hollow cathode discharge, dielectric barrier discharge, microplasmas). A set of traditional and advanced facilities will be available for the scope: mechanical machining tools, femtosecond laser for micromachining, additive electronic printing, low pressure chamber equipped to seal the metasurfaces by trapping gases at below-atmospheric pressures.
- 2) Characterization of plasma metasurfaces: the activity involves exploring the characteristics of the created devices, paying particular attention to the following aspects:
 - Voltage and current curves, power coupled to discharge: oscilloscopes, high voltage and current probes are available for this purpose.
 - Spatio-temporal evolution of the plasma discharge: for this purpose, high-speed cameras and iCCD imaging are available. Using the same instruments, it will also be possible to evaluate the response times (delay between electrical signal and ignition of the discharge)

and reconfiguration (minimum time interval between two successive discharges) of the device.

- Electron density: a set up for optical emission spectroscopy is available for this purpose.

The activities are aimed at mapping the characteristics of the different architectures created in activity 1), in order to evaluate which conditions have greater potential for application as metasurfaces in the telecommunications sector. The behavior of each architecture will thus be analysed in different configurations and operating conditions; among the parameters of interest, the following can be mentioned: type of gas, gas pressure, type of electrical power signal, materials and geometries of the devices.

References

- [1] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M. S. Alouini, "What should 6G be?," *Nat Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, 2020, doi: 10.1038/s41928-019-0355-6.
- [2] Z. Hou, C. She, Y. Li, D. Niyato, M. Dohler, and B. Vucetic, "Intelligent Communications for Tactile Internet in 6G: Requirements, Technologies, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 12, pp. 82–88, 2021, doi: 10.1109/MCOM.006.2100227.
- [3] M. Barbuto *et al.*, "Metasurfaces 3.0: A New Paradigm for Enabling Smart Electromagnetic Environments," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 70, no. 10, pp. 8883–8897, 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3130153.
- [4] M. Barbuto, A. Alù, F. Bilotti, and A. Toscano, "A New Design Strategy for Reconfigurability of Smart Electromagnetic Devices," *17th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2023*, pp. 3–5, 2023, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133384.
- [5] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [6] A. Fridman, *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008.
- [7] O. Sakai and K. Tachibana, "Plasmas as metamaterials: A review," *Plasma Sources Sci Technol*, vol. 21, no. 1, 2012, doi: 10.1088/0963-0252/21/1/013001.

Progetto di ricerca:

Le nuove tecnologie wireless, quali ad esempio i sistemi di comunicazione 5G e *beyond-5G*, stanno rapidamente espandendo i loro campi di applicazione (e.g. *Internet of Things*, *Industry 4.0* e *Smart Environments and Cities*), offrendo opportunità economiche concrete per la società. [1] Queste tecnologie devono soddisfare requisiti prestazionali altamente stringenti, che spaziano da affidabilità ultraelevata a caratteristiche di *quasi-zero latency* e resilienza a interferenze. [2] Tali requisiti risultano ancora più sfidanti se si considerano gli ambienti sempre più complessi e fortemente dinamici nei quali i sistemi wireless sono progettati per operare. [3] Su queste basi, è di fondamentale importanza adottare strategie di riconfigurabilità elettromagnetica, che permettono di adattare in *real-time* le funzionalità dei dispositivi coinvolti nei sistemi di comunicazione wireless in risposta alle diverse condizioni ambientali e operative. [4]

Nello scenario descritto, l'utilizzo di metasuperfici a base plasma appare molto promettente. Una metasuperficie è una superficie in grado di controllare la propagazione di onde elettromagnetiche grazie alla sua peculiare struttura composta da un materiale *host* e da meta-atomi (inclusioni) caratterizzati da dimensioni e *spacing* significativamente inferiori rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda incidente. [5] Nel caso di una metasuperficie a base plasma, ciascun meta-atomo è costituito da una scarica plasma, ossia un gas ionizzato quasi-neutro ed elettricamente conduttivo, composto prevalentemente da elettroni, ioni positivi e negativi, fotoni e specie reattive. [6] Dato che una scarica plasma rappresenta un ambiente estremamente reattivo la cui permittività elettrica può essere controllata nel tempo variando la densità e la frequenza di collisione elettroniche, la creazione di una metasuperficie a base plasma ha le potenzialità in termini di prestazioni e riconfigurabilità per soddisfare gli stringenti requisiti previsti per le nuove tecnologie wireless. [7]

Il presente progetto, collocato nell'ambito delle attività del progetto europeo 'PULSE - Plasma reconfigurable metasurface technologies' (<https://www.pulse-pathfinder.eu>), ha lo scopo di esplorare le potenzialità di metasuperfici al plasma riconfigurabili come 1) lenti riconfigurabili per antenne (riconfigurazione della direzione del fascio utilizzando metlenti planari; metasuperfici cilindriche circondanti un dipolo; metasuperfici planari per antenne horn o a guida d'onda), 2) dispositivi non reciproci (isolatori non reciproci magnet-less per guide d'onda) e 3) metadispositivi quadridimensionali multibanda/banda larga. L'assegnista collaborerà con il Gruppo di Ricerca per le Applicazioni Industriali del Plasma dell'Università di Bologna e gli altri partner del progetto PULSE, e si prevede che assumerà un ruolo di primo piano nella progettazione, produzione e caratterizzazione delle metasuperfici al plasma.

Piano di attività:

Il progetto di ricerca riguarda la progettazione, produzione e caratterizzazione delle metasuperfici al plasma esplorando le potenzialità della tecnologia per applicazioni nel settore delle telecomunicazioni. Il progetto prevede due principali attività:

- 1) Realizzazione di metasuperfici al plasma: l'attività prevede il progetto e la realizzazione di dispositivi al plasma basati su differenti architetture/configurazioni (glow discharge, hollow cathode discharge, dielectric barrier discharge, microplasma). Per la realizzazione dei dispositivi sarà possibile accedere a strumenti di lavorazione tradizionali (e.g. tornio, fresa, ...), laser al femtosecondo per microlavorazioni, stampa elettronica additiva, camera di bassa pressione equipaggiata per sigillare le metasuperfici intrappolando gas a pressione inferiore all'atmosfera.
- 2) Caratterizzazione delle metasuperfici al plasma: l'attività prevede di esplorare le caratteristiche dei dispositivi realizzati, ponendo particolare attenzione ai seguenti aspetti:
 - o Curve di tensione e corrente, potenza accoppiata alla scarica: a questo fine sono disponibili oscilloscopi, sonde di alta tensione e corrente.
 - o Evoluzione spazio-temporale della scarica di plasma: a questo fine sono disponibili telecamere ad alta velocità e per iCCD imaging. Mediante le stesse strumentazioni sarà

possibile anche valutare i tempi di risposta (ritardo tra segnale e accensione della scarica) e riconfigurazione (intervallo temporale minimo tra due scariche successive) del dispositivo.

- Densità elettronica: a questo fine è disponibile un set up per spettroscopia ottica ad emissione; in aggiunta, si prevede di valutare la possibilità di stimare la densità elettronica dalla combinazione delle misure di corrente e dell'imaging della scarica plasma.

Le attività sono volta a mappare le caratteristiche delle differenti architetture realizzate nell'attività 1), al fine di valutare quali condizioni abbiano maggiore potenziale per l'applicazione come metasuperfici in ambito telecomunicazioni. Di ciascuna architettura si prevede quindi di analizzare il comportamento in diverse configurazioni e condizioni operative; parametri di interesse sono, a titolo di esempio, il tipo di gas, la pressione, la tipologia di segnale elettrico di alimentazione, materiali e geometrie dei dispositivi, ...

Bibliografia

- [1] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M. S. Alouini, "What should 6G be?," *Nat Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, 2020, doi: 10.1038/s41928-019-0355-6.
- [2] Z. Hou, C. She, Y. Li, D. Niyato, M. Dohler, and B. Vucetic, "Intelligent Communications for Tactile Internet in 6G: Requirements, Technologies, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 12, pp. 82–88, 2021, doi: 10.1109/MCOM.006.2100227.
- [3] M. Barbuto *et al.*, "Metasurfaces 3.0: A New Paradigm for Enabling Smart Electromagnetic Environments," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 70, no. 10, pp. 8883–8897, 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3130153.
- [4] M. Barbuto, A. Alù, F. Bilotti, and A. Toscano, "A New Design Strategy for Reconfigurability of Smart Electromagnetic Devices," *17th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2023*, pp. 3–5, 2023, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133384.
- [5] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [6] A. Fridman, *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008.
- [7] O. Sakai and K. Tachibana, "Plasmas as metamaterials: A review," *Plasma Sources Sci Technol*, vol. 21, no. 1, 2012, doi: 10.1088/0963-0252/21/1/013001.