

Tra molecole e nanotecnologie: soluzioni avanzate per l'ambiente, la salute e l'industria

L'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie sviluppa ricerca di base e applicata in fotonica, nanoelettronica e nanotecnologie.

Biosensori • Ingegnerizzazione laser • Rilevazione di gas • Plasmi indotti da laser

L'Istituto

L'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFN), con sede a Bari, rappresenta un punto di riferimento scientifico a livello nazionale e internazionale per la ricerca fondamentale e applicata nel campo della fotonica, della nanoelettronica e delle nanotecnologie, con particolare attenzione alla micromeccanica, alla micro-nanostrutturazione laser e ai microsistemi. Inserito strategicamente all'interno del campus universitario barese, l'Istituto opera con un marcato approccio interdisciplinare, consolidato da strette e proficue collaborazioni con l'Università degli Studi di Bari Aldo Moro e con il Politecnico di Bari. La *mission* del CNR-IFN di Bari è lo sviluppo di tecnologie innovative capaci di rispondere efficacemente alle grandi sfide globali in ambiti strategici quali l'ambiente, la salute pubblica e l'industria. Inoltre, grazie alla partecipazione a numerosi progetti di ricerca nazionali e transnazionali, il CNR-IFN di Bari risulta perfettamente integrato nel tessuto industria-



Istituto di Fotonica e Nanotecnologie

Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia

le e produttivo della regione, contribuendo attivamente allo sviluppo tecnologico e all'innovazione delle imprese locali.

Tale integrazione si realizza attraverso collaborazioni dirette con industrie attive in settori strategici come l'elettronica, l'optoelettronica, la sensoristica avanzata, l'automazione industriale e il biomedicale. Dal punto di vista infrastrutturale, il CNR-IFN di Bari è dotato di una camera pulita (*clean room*) certificata ISO classe 100-1000 per la fabbricazione e la caratterizzazione di micro- e nanodispositivi. Di particolare rilievo è la disponibilità di sistemi laser ultraveloci, capaci di generare impulsi laser nell'ordine dei femtosecondi e dei picosecondi, che consentono lavorazioni ad alta risoluzione spaziale su un'ampia gamma di materiali quali metalli, semiconduttori, ceramiche, vetri e polimeri. L'impiego della tecnologia avanzata di *beam shaping*, ovvero la manipolazione accurata e controllata del fascio laser nello spazio e nel tempo, permette di ottimizzare ulteriormente i processi di lavorazione, minimizzando al contempo eventuali danni collaterali ai materiali trattati.

Sensoristica ottica e monitoraggio ambientale

La rivelazione e quantificazione di tracce gassose in matrici reali complesse è una tematica di grande interesse scientifico e industriale nelle applicazioni in campo ambientale, industriale, medico e alimentare. Un monitoraggio accurato di specifici gas permette di acquisire una comprensione più approfondita dei processi fisici e chimici in gioco, generando benefici significativi sia in termini economici sia per la tutela della salute umana e dell'ambiente.

In questo contesto la tecnica QEPAS (*Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy*) si propone come tecnologia all'avanguardia e permette la quantificazione di tracce gassose tramite la rilevazione delle onde acustiche generate dall'interazione della radiazione laser con le molecole target usando un diapason di quarzo come rivelatore. Gli studi condotti nel laboratorio Polysense, realizzato in collaborazione con l'Università, il Politecnico di Bari e Thorlabs GmbH, hanno portato allo sviluppo di sensori QEPAS con elevata sensibilità (da parti per milione fino a parti per miliardo), selettività e tempi di risposta rapidi, e allo stesso tempo portatili e compatti, ideali per le applicazioni *in situ* e in tempo reale.

Le principali aree di attività in cui è coinvolto l'IFN riguardano il monitoraggio delle emissioni dei pennacchi di gas di vulcani dormienti e caldere attive, che rivela informazioni essenziali sui processi magmatici e idrotermali sotto la superficie, fornendo uno strumento indispensabile per il controllo dei vulcani, specialmente nelle fasi di risveglio. I sensori QEPAS per il rilevamento del solfuro di idrogeno e del diossido di zolfo consentono la loro quantificazione, con sensibilità nell'ordine delle parti per milione, anche all'interno di matrici gassose complesse costituite da anidride carbonica e vapore acqueo.

In ambito medico, l'utilizzo di un campio-

Un monitoraggio accurato di specifici gas permette di acquisire una comprensione più approfondita dei processi fisici e chimici generando benefici significativi sia in termini economici sia per la tutela della salute umana e dell'ambiente.

ISTITUTO DI FOTONICA e NANOTECNOLOGIE



Strumentazioni e ambienti di ricerca dell'IFN Bari.

natore di respiro in linea con un sensore QEPAS consente di quantificare la presenza di specifici composti organici volatili che possono essere utilizzati come biomarcatori di patologie [1]. In questo contesto, l'analisi ottica del respiro con un sensore QEPAS offre una potenziale alternativa all'attuale tecnica standard basata su gascromatografia e spettrometria di massa, con vantaggi di costi, portabilità e rapidità di risposta.

In ambito alimentare, la combinazione di una colonna cromatografica con un sensore QEPAS permette l'analisi della parte volatile di complesse miscele alimentari. Nel caso specifico di caffè e mandorle, la rilevazione e quantificazione di molecole appartenenti alle classi chimiche di piridine, pirazine, aldeidi e furani è utilizzata per il controllo della qualità degli alimenti – verificando che composti potenzialmente dannosi per la salute non superino determinate soglie – e l'autenticazione degli stessi.

Parallelamente, la tecnica LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) consente analisi rapide e accurate della composizione chimica di una vasta gamma di campioni solidi e liquidi. Basata sulla ge-

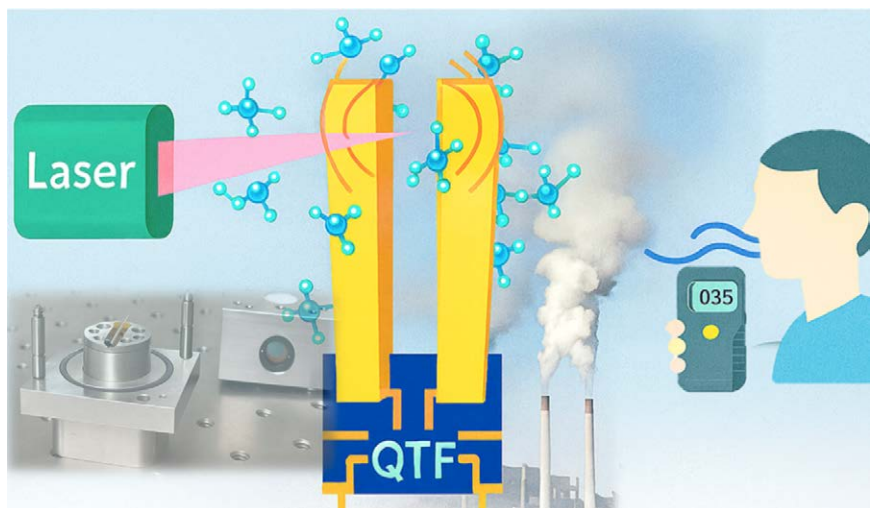
nerazione di un plasma mediante impulso laser focalizzato sul campione, la LIBS è una tecnica di analisi elementare microdistruttiva, multielementare, caratterizzata da tempi di misura estremamente brevi e dall'assenza di pretrattamenti specifici del campione. Sono state messe a punto strategie avanzate che prevedono l'uso di impulsi laser multipli e l'integrazione di nanoparticelle, con l'obiettivo di amplificare il segnale emesso dal plasma e migliorare in modo significativo i limiti di rivelabilità [2]. Tali innovazioni rendono la LIBS una tecnica pienamente competitiva rispetto ai metodi analitici convenzionali, pur mantenendo vantaggi in termini di rapidità, versatilità e portabilità.

Uno degli aspetti più rilevanti della LIBS è infatti la possibilità di progettare dispositivi compatti e facilmente trasportabili, capaci di operare direttamente *in situ* anche in ambienti estremi o difficilmente accessibili. Questa caratteristica ne consente l'impiego per l'analisi diretta di suoli e acque, facilitando l'identificazione rapida di metalli strategici per l'industria (come zinco, rame e nichel) e di contaminanti pericolosi per la salute e l'ambiente (come arsenico, piombo, mercurio e cadmio). Inoltre, la possibilità di utilizzo in remoto rende la LIBS particolarmente adatta alla caratterizzazione in tempo reale delle polveri fini emesse dai pennacchi vulcanici, permettendo l'analisi anche di elementi leggeri come litio, boro e berillio. Questa versatilità operativa contribuisce significativamente al monitoraggio ambientale e alla gestione tempestiva dei rischi naturali o antropici.

Tecnologie laser a impulsi ultracorti: precisione, versatilità e applicazioni avanzate

Le tecnologie laser a impulsi ultracorti rappresentano la frontiera della microlavorazione di materiali quali metalli, semiconduttori, ceramiche, vetri, polimeri, cristalli e compositi. La capacità intrinseca di impulsi laser a femtosecondi di modificare materiali con precisione micro- e nanometrica e danni collaterali minimi apre nuove opportunità per processi di precisione quali microfresatura, microforatura, incisione, saldatura, taglio, strutturazione superficiale, scrittura di guide ottiche, stampa 3D e sintesi di nanocompositi innovativi.

Le principali aree di ricerca comprendono il *beam shaping* temporale e spaziale avanzato, che apre la



Sensori QEPAS per l'analisi in campo ambientale e biomedicale.

strada a efficienti applicazioni innovative e a nuovi processi realizzabili. Così, grazie alla generazione di raffiche di impulsi ultrabrevi (i cosiddetti "*burst*") e di ottiche avanzate, è possibile contrastare i fenomeni termici che caratterizzano l'interazione laser-materia e modificare, in tal modo, le proprietà dei materiali con una precisione elevatissima (micro- e nanoscala). In questo ambito, si annoverano la funzionalizzazione laser delle superfici (superidrofilità, superidrofobicità, riduzione attrito, antighiaccio), la modifica delle superfici via laser per il miglioramento delle prestazioni di celle elettrolitiche e per la riduzione dell'adesione batterica, la fabbricazione laser di dispositivi microfluidici in matrici polimeriche e altri materiali per applicazioni biomedicali, lo studio di processi basati su plasma indotto dal laser (LIP) per analisi spettroscopiche, la produzione di nanoparticelle tramite ablazione laser in liquidi (PLAL) e studi di interazione con sistemi biologici [3].

Biosensori a singola molecola

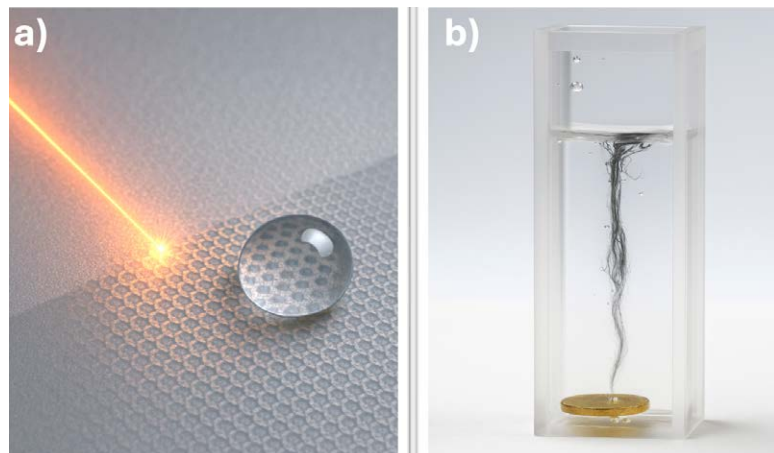
Nel campo della biosensoristica gli studi sono focalizzati sullo sviluppo di dispositivi innovativi basati sul grafene e transistor a singola molecola (SiMoT, *Single Molecule with a Transistor*) in collaborazione con l'Università di Bari. I biosensori hanno limiti di sensibilità fino alla singola molecola di biomarcatori patologici e contaminanti chimici, come le immunoglobuline M e G (IgM, IgG), singole sequenze di DNA, m-RNA e proteina C reattiva. Ad esempio, la presenza di IgM, ad alte concentrazioni in pazienti con mieloma multiplo già dalle prime fasi della

malattia, può essere rilevata grazie alla capacità del biosensore di amplificare il segnale generato da un singolo immunocomplesso. Una scoperta chiave del gruppo barese è che la formazione di un solo immunocomplesso sulla superficie sensibile del biosensore è sufficiente a innescare un processo di amplificazione a cascata. Questo fenomeno modifica irreversibilmente le proprietà elettrostatiche della superficie, generando una variazione misurabile. Tale meccanismo, osservato e caratterizzato con la microscopia a forza atomica con sonda Kelvin (KPFM), è alla base del funzionamento dei SiMoT. L'effetto domino trasforma un evento molecolare isolato in una risposta elettronica robusta e leggibile.

Particolare attenzione è inoltre rivolta allo studio dell'attività e delle proprietà di film proteici depositati sulle superfici sensibili dei dispositivi. In particolare, vengono analizzate le caratteristiche dielettriche e bioelettroniche di tali strati, investigando in dettaglio la stabilità, l'omogeneità strutturale e le interazioni molecolari che si instaurano in risposta a stimoli esterni controllati come campi elettrici applicati. I ricercatori dell'IFN hanno infatti dimostrato che l'applicazione ciclica di campi elettrici consente di modulare e stabilizzare efficacemente il biostrato, minimizzando la variabilità dei parametri elettrici critici per il funzionamento del sensore [4]. Tale approccio integra la ricerca fondamentale sui meccanismi molecolari con lo sviluppo tecnologico di nuove generazioni di biosensori compatti, altamente sensibili e stabili, destinati a innovativi impieghi diagnostici e ambientali.

Piattaforme di ricerca e innovazione per la scienza e l'industria

L'IFN Bari partecipa attivamente a progetti di ampio respiro, sia a livello europeo che nazionale, assumendo un ruolo di primo piano nella ricerca collaborativa e nel trasferimento tecnologico. L'Istituto non si limita a sviluppare soluzioni nei propri laboratori, ma le porta all'interno di reti globali dove università, centri di ricerca e partner industriali condividono competenze, *know-how* e infrastrutture, creando un ecosistema virtuoso di innovazione e applicazioni. Nel contesto europeo, l'IFN Bari è parte integrante di Horizon Europe, contribuendo allo sviluppo di sensori ottici quantistici ad altissima sensibilità, destinati alla rilevazione ambientale e al monitoraggio di emissioni inquinanti. Ha partecipato inoltre alla



Alcuni esempi di utilizzo dei laser. a) Funzionalizzazione di superfici: esempio di superidrofobicità indotta dalla strutturazione laser. b) Nanoparticelle di oro in MTEOA MeOSO₃ (sale ad alta densità) prodotte per ablazione laser.

Graphene Flagship, uno dei più ambiziosi progetti di ricerca dell'Unione Europea, sviluppando dispositivi optoelettronici basati su grafene per la modulazione di onde Terahertz, biosensori ultrasensibili e fotonica riconfigurabile. All'interno della piattaforma Photonics21 lavora su sistemi di rilevamento intelligenti per l'industria 4.0, progettando soluzioni integrate basate su tecniche QEPAS e LIBS per il controllo in tempo reale di processi industriali e ambienti produttivi.

Sul fronte nazionale, l'IFN Bari è attivamente coinvolto nei progetti del PNRR, e rappresenta uno dei nodi strategici della rete Rome Technopole. Partecipa anche a iniziative finanziate dal MUR per lo sviluppo di laser ultraveloci e dispositivi fotonici integrati, con ricadute importanti nei settori della microelettronica, della diagnostica e dell'aerospazio. L'Istituto ha inoltre instaurato numerose e fruttuose collaborazioni con il distretto della mecatronica pugliese, che hanno portato alla realizzazione di brevetti e alla pubblicazione di numerosi lavori scientifici.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. ELEFANTE *et al.*, "Environmental Monitoring of Methane with Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy Exploiting an Electronic Hygrometer to Compensate the H₂O Influence on the Sensor Signal", *Sensors*, 20, 10, 2020.
- [2] M. DELL'AGLIO *et al.*, "Sensing nanoparticle-protein corona using nanoparticle enhanced Laser Induced Breakdown Spectroscopy signal enhancement", *Talanta*, 235, 2021.
- [3] C. GAUDIUSO *et al.*, "Laser ablation of silicon with THz bursts of femtosecond pulses", *Scientific Reports*, 11, 1, 2021.
- [4] C. DI FRANCO *et al.*, "Electric Field Cycling of Physisorbed Antibodies Reduces Biolayer Polarization Dispersion", *Advanced Science*, 12, 1, 2025.