



Mario Prosa, PhD
Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati (ISMN)
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Bologna
mario.prosa@cnr.it

DOI: <http://dx.medra.org/10.17374/CI.2023.105.2.56>

UN SENSORE PER RIDURRE LE PERDITE ALIMENTARI

Le contaminazioni alimentari che si propagano fino alle fasi avanzate di produzione causano ingenti problematiche economiche, sociali ed ambientali. Grazie all'innovativa integrazione di due dispositivi optoelettronici organici e di un reticolo plasmonico nasce una nuova classe di sensori miniaturizzati per analizzare gli alimenti nelle prime fasi di produzione.

Con una popolazione mondiale di quasi 8 miliardi di persone la sostenibilità alimentare è un tema di primaria importanza. Ogni anno circa 1,3 miliardi di tonnellate di cibo vengono persi o sprecati, con delle perdite economiche che, in Europa, si attestano intorno ai 143 miliardi di euro [1]. Le conseguenze però non sono soltanto economiche. Le perdite e gli sprechi alimentari generano infatti il 6% delle emissioni globali di gas serra [2].

La causa dell'inefficienza alimentare è principalmente dovuta agli sprechi dei piccoli venditori e dei consumatori, e alle perdite che avvengono invece durante le fasi di produzione e di distribuzione [1]. In quest'ultimo caso, le azioni di smaltimento vengono intraprese in seguito ad eventi di contaminazione chimica o biologica. Ne consegue una forte necessità di controllare l'intera filiera alimentare, soprattutto nelle prime fasi di produzione dove è ancora possibile attuare azioni correttive

per evitare che la contaminazione raggiunga le fasi di raccolta e smistamento (Fig. 1).

Ad oggi esistono diversi strumenti di analisi che permettono di verificare la sicurezza alimentare prima che il cibo arrivi al consumatore. Spesso viene utilizzato un metodo di rilevamento del contaminante basato sul fenomeno della risonanza plasmonica di superficie (SPR) [3]. Il metodo è molto efficiente ma richiede l'utilizzo di componenti ottiche ingombranti e costose, per cui tali sensori SPR trovano applicazione principalmente su scala di laboratorio. Il trasporto dei campioni dal sito di produzione ai laboratori, oltre ad incrementare i costi di analisi, introduce un ritardo nel processo analitico a discapito della necessità di monitoraggio nelle prime fasi di produzione (Fig. 1).

Per sopperire a tale necessità è basilare progettare un sensore SPR che sia miniaturizzato, veloce nella risposta, a basso costo e facile da utilizzare

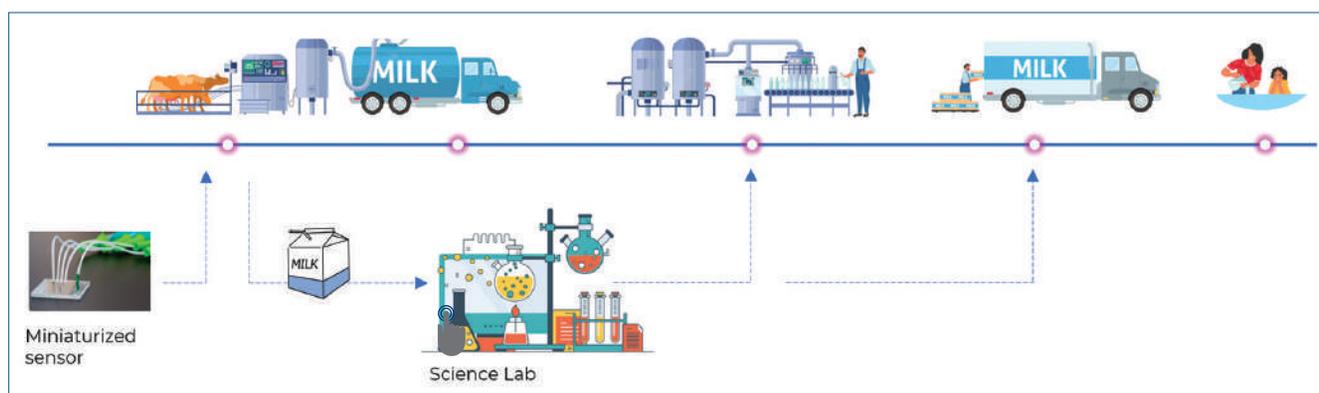


Fig. 1 - Strumenti di analisi nella filiera produttiva del latte

Mario Prosa (Divisione di Chimica Fisica), autore del lavoro "Organic Light-Emitting Transistors in a Smart-Integrated System for Plasmonic-Based Sensing", pubblicato su *Advanced Functional Materials*, 2021, **31**, 2104927 (DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202104927>) e condotto presso il CNR-ISMN, è risultato vincitore del Premio Levi 2021 attribuito dal Gruppo Giovani della Società Chimica Italiana.

Qui il link al [video](#).



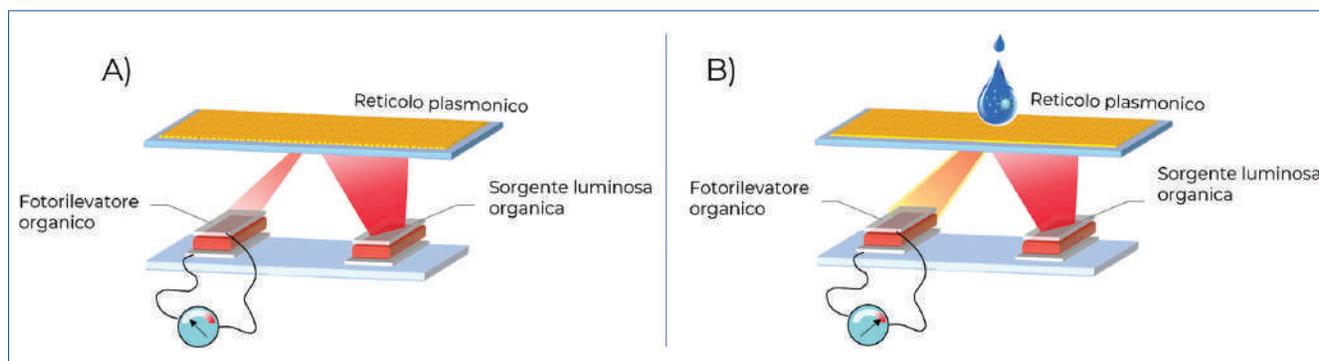


Fig. 2 - Sensore SPR miniaturizzato che comprende un dispositivo elettroluminescente organico, un fotorilevatore organico e un reticolo plasmonico nanostrutturato (A); principio di funzionamento del sensore in cui la presenza di un contaminante induce una variazione dell'intensità della luce che raggiunge il fotorilevatore con conseguente incremento del segnale elettrico in uscita (B)

da operatori non esperti, così da abilitare le analisi direttamente sul luogo di interesse. Il nuovo strumento di analisi deve obbligatoriamente mantenere le proprietà principali dei sensori SPR, cioè avere un'alta sensibilità, fornire un riconoscimento selettivo dei contaminanti, garantire analisi quantitative o semi-quantitative e consentire più analisi su un unico campione.

Uno dei modi per soddisfare questi requisiti è attraverso la combinazione dell'*optoelettronica organica*, nota per la sua versatilità e il basso costo, e la *plasmonica*, che fornisce alte prestazioni analitiche. Lo scopo è quello di attivare il fenomeno dell'SPR utilizzando dei sistemi ottici miniaturizzati basati su materiali nanostrutturati.

L'optoelettronica organica è rinomata per le dimensioni estremamente ridotte (spessore intorno alle centinaia di nanometri) e le caratteristiche facilmente adattabili al campo di applicazione [4]. Negli anni questi sistemi sono diventati parte della società, come nel caso dei diodi organici ad emissione di luce (OLED) che attualmente costituiscono i display di alcuni smartphone.

Di recente, la tecnologia ha avuto un ulteriore sviluppo grazie all'accoppiamento di due dispositivi, un OLED e un fotorilevatore organico (OPD), su un'unica piattaforma per ottenere un sistema in grado sia di emettere che di leggere segnali ottici. È nata una nuova classe di sistemi optoelettronici multifunzionali che possono, ad esempio, riconoscere il grado di saturazione di ossigeno nel sangue [5-7].

L'utilizzo di una piattaforma miniaturizzata di questo tipo per attivare il fenomeno dell'SPR favorirebbe l'espletamento dei processi analitici sul sito di produzione o sul luogo interesse.

Nel nuovo concetto di sensore SPR, la piattaforma organica che comprende la sorgente luminosa (es. OLED) e il fotorilevatore ottico (es. OPD), coopera con l'elemento cardine per le analisi che è il reticolo plasmonico nanostrutturato (Fig. 2a). Si tratta di una struttura le cui caratteristiche ottiche cambiano in risposta ad una variazione di indice di rifrazione [8]. Nello specifico, quando la superficie superiore del reticolo plasmonico viene esposta ad una variazione di indice di rifrazione, dovuta alla presenza di un contaminante, l'intensità della luce riflessa dalla superficie inferiore del reticolo viene modulata di conseguenza (Fig. 2b).

Per uno sviluppo sperimentale del sensore è necessario che i singoli dispositivi rispondano nella stessa regione spettrale così che possano interagire otticamente. A tal proposito, è opportuno sottolineare che le caratteristiche del reticolo sono estremamente sensibili all'angolo di riflessione, e, solitamente, l'efficienza massima si ottiene intorno a 0°. Questo requisito può essere soddisfatto avvicinando i due dispositivi organici quanto più possibile, compatibilmente con le tolleranze di fabbricazione. In alternativa, i limiti tecnici si possono superare combinando un OPD con un particolare dispositivo elettroluminescente denominato OLET, acronimo di "organic light-emitting transistor".

È un dispositivo che emette una striscia luminosa larga qualche decina di micrometri, la cui posizione può essere modulata lateralmente in base al voltaggio di lavoro che viene applicato al dispositivo [9]. Integrando un OPD direttamente sull'OLET si ottiene, quindi, un nuovo dispositivo con la capacità di variare a piacimento la distanza tra la zona di emissione di luce e quella di lettura del segnale ottico

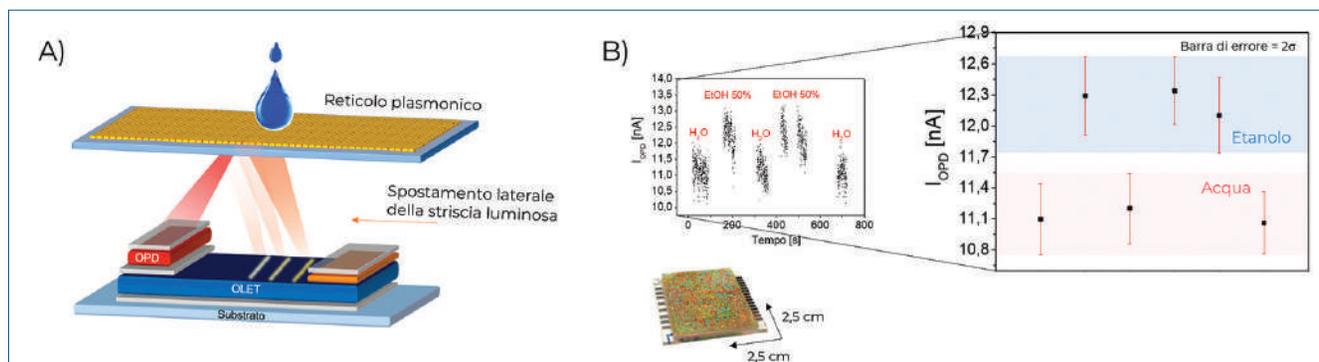


Fig. 3 - Sensore SPR in cui il reticolo plasmonico viene attivato da un dispositivo che integra un OPD direttamente su un elettrodo di un OLET; la striscia micrometrica di luce dell'OLET può essere spostata lateralmente riducendo l'angolo di riflessione sul reticolo (A). Foto del sensore SPR miniaturizzato e sua risposta nel tempo, espressa come fotocorrente dell'OPD (I_{OPD}), alternando acqua o etanolo (50% v/v in acqua) sulla superficie del reticolo plasmonico quando l'OLET è acceso ad un voltaggio costante (B)

(Fig. 3a). In vista dell'implementazione del reticolo plasmonico, tale dispositivo permetterebbe quindi di selezionare l'angolo di lavoro ottimale del sensore SPR, arrivando anche a valori di quasi normalità della riflessione [10].

OLET, OPD e reticolo plasmonico sono però oggetti tridimensionali caratterizzati da proprietà non ideali per cui, per un'accurata valutazione e progettazione della geometria del sensore, bisogna considerare tutti gli angoli diedri, la possibile polarizzazione della luce, gli effetti di diffrazione e le tolleranze del processo di fabbricazione dei dispositivi. Alcuni metodi semi-analitici computazionali sono estremamente efficaci per simulare e individuare le caratteristiche geometriche per un funzionamento ottimale del sensore SPR, come, ad esempio, l'utilizzo di metodi misti (esempio: *rigorous wave coupled analysis* e *field tracing*).

Mediante l'utilizzo delle tecniche di sublimazione in alto vuoto, per i dispositivi optoelettronici, e della litografia colloidale, per il reticolo plasmonico, si riescono a garantire tutti i requisiti per l'ottenimento del sensore SPR.

Il corretto funzionamento può essere verificato esponendo la superficie esterna del reticolo a soluzioni di saccarosio o etanolo. La risposta elettrica dell'OPD viene monitorata nel tempo dopo aver acceso l'OLET con un voltaggio adeguato. Il saccarosio o l'etanolo sono dei liquidi di riferimento che servono ad indurre variazioni di indice di rifrazione sulla superficie del reticolo in modo paragonabile a quelle indotte dalla presenza di un contaminante. Come si vede in Fig. 3b, cambiare il liquido di analisi da acqua ad una soluzione acquosa di etanolo

al 50% v/v comporta un cambiamento della fotocorrente dell'OPD. Questa transizione da acqua ad etanolo può essere correlata alla variazione di segnale indotta da 10 ng/mm² di contaminante proteico sulla superficie plasmonica.

La possibilità di funzionalizzare il reticolo plasmonico con opportuni elementi di bioriconoscimento consentirebbe, infatti, di analizzare analiti di interesse alimentare, come ad esempio la lattoferrina e la streptomycina nel latte [11]. Il primo analita è una proteina con cui si valuta la qualità del latte, mentre il secondo è un antibiotico che, se assunto periodicamente, può causare problemi di antibiotico-resistenza. Inoltre, le dimensioni molto contenute del sensore (inferiore a 0,1 cm³) unitamente alla presenza di più sensori su un unico substrato permetterebbe di fare molteplici indagini analitiche contemporanee su uno stesso campione.

È evidente che la potenzialità analitica del sensore dipende fortemente dalla sinergia tra elementi di diversa natura e ambito disciplinare, come l'optoelettronica, la plasmonica, la microfluidica, la biodiagnostica e la gestione dei dati.

L'importanza di sviluppare sistemi di questo tipo risiede principalmente nella versatilità applicativa che prelude ad una diffusione dei biosensori portatili nei più svariati campi, che possono riguardare l'alimentazione, il monitoraggio ambientale o anche la diagnostica medica.

La Comunità Europea ha recentemente finanziato due progetti nell'agroalimentare con l'obiettivo di sviluppare questa tipologia di sensori per utilizzarli nella filiera di produzione del latte [12], o per l'analisi di contaminanti da parte di piccoli produttori e



rivenditori locali in catene alimentari come l'acquaponica, il miele, la birra e il latte crudo [13]. Il forte interesse della Comunità Europea incontra, infatti, quello di grandi aziende alimentari come Parmalat, controllata dalla multinazionale Lactalis, o di organizzazioni di agricoltori come Confagricoltura. I consorzi di questi progetti uniscono enti specializzati in diversi ambiti disciplinari e sono coordinati dal Consiglio Nazionale delle Ricerche.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/food-losses-waste/>
- [2] J. Poore, T. Nemecek, *Science*, 2018, **360**, 987.
- [3] L. Jason-Moller, M. Murphy, J.A. Bruno, *Curr. Protoc. Protein Sci.*, 2006, **19**(13), 45.
- [4] G. Schweicher, G. Garbay *et al.*, *Adv. Mater.*, 2020, **32**, 1905909.
- [5] C.M. Lochner, Y. Khan *et al.*, *Nat. Commun.*, 2014, **5**, 1.
- [6] Y. Khan, D. Han *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2018, **115**, E11015.
- [7] A.K. Bansal, S. Hou *et al.*, *Adv. Mater.*, 2015, **27**, 7638.
- [8] B. Bottazzi, L. Fornasari *et al.*, *J. Biomed. Opt.*, 2014, **19**, 017006.
- [9] M. Prosa, S. Moschetto *et al.*, *J. Mater. Chem. C*, 2020, **8**, 15048.
- [10] M. Prosa, E. Benvenuti *et al.*, *Adv. Funct. Mater.*, 2021, **31**, 2104927.
- [11] M. Bolognesi, M. Prosa *et al.*, *Adv. Mater.*, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202208719>
- [12] <https://www.moloko-project.eu/>
- [13] <https://h-alo.eu/>

A Sensor Tackling Food Loss

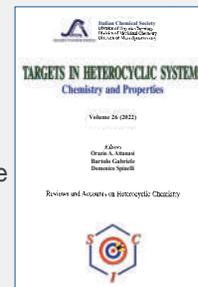
Food contamination spreading to advanced food production and processing stages causes relevant economic, social, and environmental issues. Integrating two organic optoelectronic devices and a plasmonic grating enables the development of a new class of miniaturized sensors for the analysis of food at an early stage of the supply chain.

LIBRI E RIVISTE SCI

Targets in Heterocyclic Systems Vol. 26

È disponibile il 26° volume della serie "Targets in Heterocyclic Systems", a cura di Orazio A. Attanasi, Bortolo Gabriele, Pedro Merino e Domenico Spinelli

https://www.soc.chim.it/it/libri_collane/th/s/vol_26_2022



Sono disponibili anche i volumi 1-25 della serie.

I seguenti volumi sono a disposizione dei Soci gratuitamente, è richiesto soltanto un contributo spese di € 10:

- G. Scorrano "La Storia della SCI", Edises, Napoli, 2009 (pp. 195)
- G. Scorrano "Chimica un racconto dai manifesti", Canova Edizioni, Treviso, 2009 (pp. 180)
- AA.VV. CnS "La Storia della Chimica" numero speciale, Edizioni SCI, Roma 2007 (pp. 151)
- AA.VV. "Innovazione chimica per l'applicazione del REACH" Edizioni SCI, Milano, 2009 (pp. 64)

Oltre "La Chimica e l'Industria", organo ufficiale della Società Chimica Italiana, e "CnS - La Chimica nella Scuola", organo ufficiale della Divisione di Didattica della SCI (www.soc.chim.it/riviste/cns/catalogo), rilevante è la pubblicazione, congiuntamente ad altre Società Chimiche Europee, di riviste scientifiche di alto livello internazionale:

- ChemPubSoc Europe Journal
- Chemistry A European Journal
- EURJOC
- EURJIC
- ChemBioChem
- ChemMedChem
- ChemSusChem
- Chemistry Open

- ChemPubSoc Europe Sister Journals
- Chemistry An Asian Journal
- Asian Journal of Organic Chemistry
- Angewandte Chemie
- Analytical & Bioanalytical Chemistry
- PCCP, Physical Chemistry Chemical Physics

Per informazioni e ordini telefonare in sede, 06 8549691/8553968, o inviare un messaggio a segreteria@soc.chim.it