



Norberto Manfredia*, Lorenzo Zani^{b,*},
Alessandro Abbotta, Alessandro Mordini^{b,c}

^aDipartimento di Scienza dei Materiali e Centro Milano-Bicocca per lo Studio di Materiali, Processi e Dispositivi per l'Energia Solare MIB-SOLAR
Università di Milano-Bicocca e INSTM Milano-Bicocca

^bCNR-ICCOM, Sesto Fiorentino (FI)

^cDipartimento di Chimica "U. Schiff", Università di Firenze

FOTOSINTESI ARTIFICIALE CON COLORANTI ORGANICI PER LA PRODUZIONE SOSTENIBILE DI COMBUSTIBILI

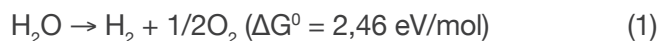
La produzione di idrogeno attraverso la fotoscissione catalitica dell'acqua ("fotosintesi artificiale") rappresenta un metodo promettente per convertire l'energia solare in un vettore chimico facilmente immagazzinabile. Questo articolo presenta una breve panoramica dei sistemi fotocatalitici e fotoelettrochimici per la fotosintesi artificiale che usano coloranti organici come sensibilizzatori per l'assorbimento della luce visibile.

Introduzione

Il progressivo esaurimento delle fonti energetiche fossili, unito al negativo impatto ambientale derivante dal loro sfruttamento intensivo, esige un drastico cambiamento nelle modalità di approvvigionamento energetico della nostra civiltà. In quest'ottica, l'impiego efficiente dell'energia solare come fonte rinnovabile di elettricità gioca un ruolo fondamentale per favorire una transizione verso una società energeticamente più equa e sostenibile. Tuttavia, l'energia solare ha lo svantaggio di essere discontinua (a causa della transizione ciclica tra giorno e notte e delle condizioni meteorologiche variabili) e ciò porta a scompensi nella fornitura di corrente elettrica nella rete. Questo problema è parzialmente mitigato dai sistemi di accumulo che, al momento, sono principalmente batterie.

Benché l'elettricità sia una forma di energia utilizzata per un crescente numero di applicazioni, la maggior parte delle attività, specialmente quelle fortemente energivore, devono ancora oggi essere alimentate con combustibili (circa tre quarti della domanda finale di energia). Una possibile soluzione al problema

della produzione rinnovabile di combustibili ci viene fornita, come spesso accade, dalla natura, che ha già sviluppato metodi chimici di immagazzinamento dell'energia solare noti con il termine di fotosintesi clorofilliana. Infatti, gli organismi fotosintetici sono in grado di convertire la luce solare e l'acqua in "equivalenti" di idrogeno che poi utilizzano per fissare la CO₂ producendo "combustibili" che usano per alimentarsi. Uno degli obiettivi della chimica moderna applicata all'energia dovrebbe quindi essere la messa a punto di materiali e dispositivi capaci di rendere accessibile questo processo. Per questo motivo, la ricerca si è concentrata sullo sviluppo di sistemi efficienti per lo svolgimento della reazione di fotodissociazione dell'acqua (*water splitting*, WS) in H₂ ed O₂, spesso indicata come "fotosintesi artificiale" (eq. 1). L'idrogeno prodotto può così essere utilizzato come vettore nel quale immagazzinare l'energia solare per utilizzarla quando necessario (ad esempio per produrre elettricità in celle a combustibile):





La sfida è costituita dal fatto che si tratta di un processo multielettronico endotermico (1,23 eV richiesti per ogni elettrone coinvolto) ed è caratterizzato da un'alta energia di attivazione, richiedendo quindi l'uso di catalizzatori per promuovere la formazione dei prodotti. Attualmente, esistono tre diversi approcci per realizzare la dissociazione dell'acqua sfruttando l'energia solare: l'uso di pannelli fotovoltaici accoppiati ad elettrolizzatori, l'uso di sistemi fotocatalitici (PC) e l'impiego di celle fotoelettrochimiche (PEC). In questo breve manoscritto focalizzeremo la nostra attenzione solo sui sistemi diretti di conversione della luce solare in idrogeno (noti anche come processi di fotosintesi artificiale), in particolare i sistemi PC e PEC dove l'assorbimento della luce, e talvolta la catalisi, sono ad opera di sistemi molecolari organici oppure organometallici.

Fotocatalizzatori sensibilizzati a colorante, DS-PC

La possibilità di produrre efficacemente idrogeno attraverso un processo fotocatalitico è stata dimostrata per la prima volta nel 1972, quando Fujishima e Honda descrissero la scissione fotoindotta dell'acqua in H_2 e O_2 per mezzo di un fotoanodo di biossido di titanio (TiO_2) collegato ad un catodo di platino in una cella elettrochimica [1]. Lo svantaggio principale di tale approccio consisteva nell'usare come materiale fotoassorbente un semiconduttore (SC) con ampio *band-gap* ($\geq 3,0$ eV), incapace quindi di assorbire la luce visibile ($\lambda > 400$ nm), rendendo pertanto necessario sfruttare la sola radiazione UV per promuovere la reazione.

Per risolvere tale problema sono state proposte diverse possibili soluzioni [2], come l'uso di SC inorganici dotati di minore *band-gap*, la modifica chimica di materiali ad ampia banda proibita per conferire loro la capacità di assorbire la luce visibile, oppure l'applicazione di sistemi fotocatalitici più complessi, come, ad esempio, quelli basati sul cosiddetto "schema Z", risultante dall'accoppiamento di due semiconduttori diversi. Una delle strategie di maggior successo si è tuttavia rivelata la sensibilizzazione di SC ad ampio *band-gap* con coloranti molecolari in grado di assorbire la luce nel campo del visibile e successivamente trasferire gli elettroni fotoeccitati. Tale concetto è efficacemente sfruttato

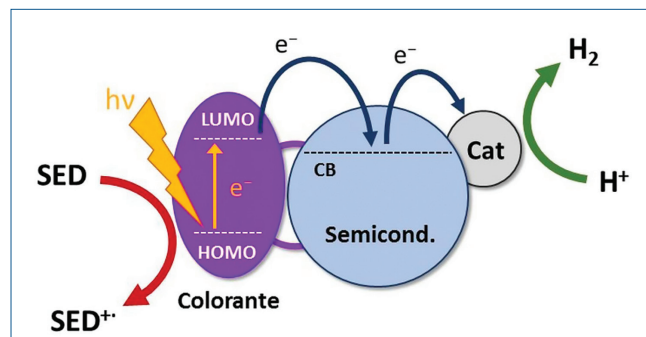


Fig. 1 - Meccanismo generale di funzionamento di un sistema DS-PC

nei dispositivi fotovoltaici noti come "celle solari a colorante", ovvero DSSC (dall'inglese *dye-sensitized solar cells*) [3]: pertanto, sistemi fotocatalitici di questo tipo sono spesso chiamati "fotocatalizzatori sensibilizzati a colorante" o DS-PC (*dye-sensitized photocatalysts*).

La struttura ed il meccanismo di funzionamento di un DS-PC sono riportati in Fig. 1 [4]. In un tale sistema, il colorante molecolare ed un opportuno catalizzatore (utilizzato per promuovere la formazione di H_2) sono entrambi adsorbiti sulla superficie di un semiconduttore nanocristallino, tipicamente disperso in acqua o in una miscela idroalcolica, che agisce sia da supporto che da unità di trasferimento elettronico. Quando il colorante viene colpito dalla radiazione luminosa è in grado di assorbire i fotoni di energia pari o superiore a quella del suo intervallo HOMO-LUMO, raggiungendo uno stato eccitato. Se l'energia del LUMO è più alta di quella della banda di conduzione (CB) del SC, il colorante può trasferire a quest'ultimo gli elettroni fotoeccitati (la cosiddetta "iniezione elettronica"), ossidandosi. In questo modo si ottiene una separazione di carica tra elettroni (localizzati sul semiconduttore) e lacune (sul radicale catione del colorante). Gli elettroni sono poi trasferiti dal SC al catalizzatore, sul quale avviene la reazione di riduzione dei protoni ad H_2 . Il colorante ossidato è poi rigenerato da un opportuno donatore di elettroni, terminando il ciclo catalitico.

Naturalmente, la soluzione ideale per la rigenerazione del colorante sarebbe costituita dall'utilizzo della stessa acqua come specie riducente, realizzando così un vero e proprio processo di *water splitting* e producendo solo O_2 come sottoprodotto. Tuttavia, data la complessità di questo tipo di reazione, essa

viene più comunemente svolta in dispositivi fotoelettrochimici tipo DS-PEC (v. oltre), dove può essere promossa grazie all'applicazione di un potenziale esterno. Nel caso di semplici sistemi DS-PC si opta più di frequente per l'uso di donatori di elettroni sacrificali (SED), la cui ossidazione è più facile e veloce di quella dell'acqua; tale approccio consente di massimizzare la produzione di H_2 , ma chiaramente risulta sostenibile solo nel caso in cui si utilizzino SED derivanti da risorse rinnovabili.

Uno dei vantaggi principali del sistema a tre componenti (colorante, SC, catalizzatore) sopra descritto consiste nella sua versatilità: ciascun materiale, infatti, può essere modificato indipendentemente dagli altri, alterando le proprietà ottiche ed elettrochimiche dell'insieme in modo da adattarle alla specifica reazione ed alle condizioni di interesse. I coloranti usati per la produzione di H_2 con DS-PC assomigliano generalmente a quelli impiegati nelle DSSC, anche se nel corso del tempo sono stati ottimizzati verso questa specifica applicazione. Essi possono essere classificati in due categorie principali, vale a dire: complessi bi- o terpiridinici di rutenio (II) e coloranti organici. Questi ultimi possono poi essere ulteriormente suddivisi in tre sotto-categorie, ovvero porfirine/ftalocianine, composti organici fluorescenti (tradizionalmente utilizzati in biologia molecolare) e

coloranti organici coniugati dotati di struttura donatore (D)-accettore (A) (D- π -A) (Fig. 2) [5]. Come si può notare, tutti questi composti sono generalmente caratterizzati dalla presenza di gruppi ancoranti che ne assicurino il robusto ancoraggio alla superficie del semiconduttore; quando quest'ultimo è costituito da un ossido metallico, la scelta più comune ricade sui gruppi carbossilico e fosfonico.

In particolare, i coloranti organici di tipo D- π -A hanno di recente acquisito una particolare rilevanza, grazie alla loro facilità di sintesi ed alla possibilità di modularne le proprietà di fotoassorbimento per mezzo di semplici modifiche strutturali [6], divenendo la principale classe di sensibilizzatori utilizzata negli ultimi dieci anni. In particolare, vari studi hanno dimostrato come la progettazione razionale della struttura dei coloranti, che include la natura del sistema coniugato, la disposizione dei sostituenti e la modulazione delle loro proprietà idrofobiche/idrofiliche, consenta di alterarne in modo significativo le caratteristiche chimico-fisiche, permettendo un notevole incremento delle prestazioni dei corrispondenti sistemi DS-PC [7].

Per quanto riguarda il semiconduttore, la maggior parte dei lavori si concentra sull'uso di TiO_2 nella sua forma cristallina più comune (anatasio), ma non mancano studi che riportano l'impiego di altri ma-

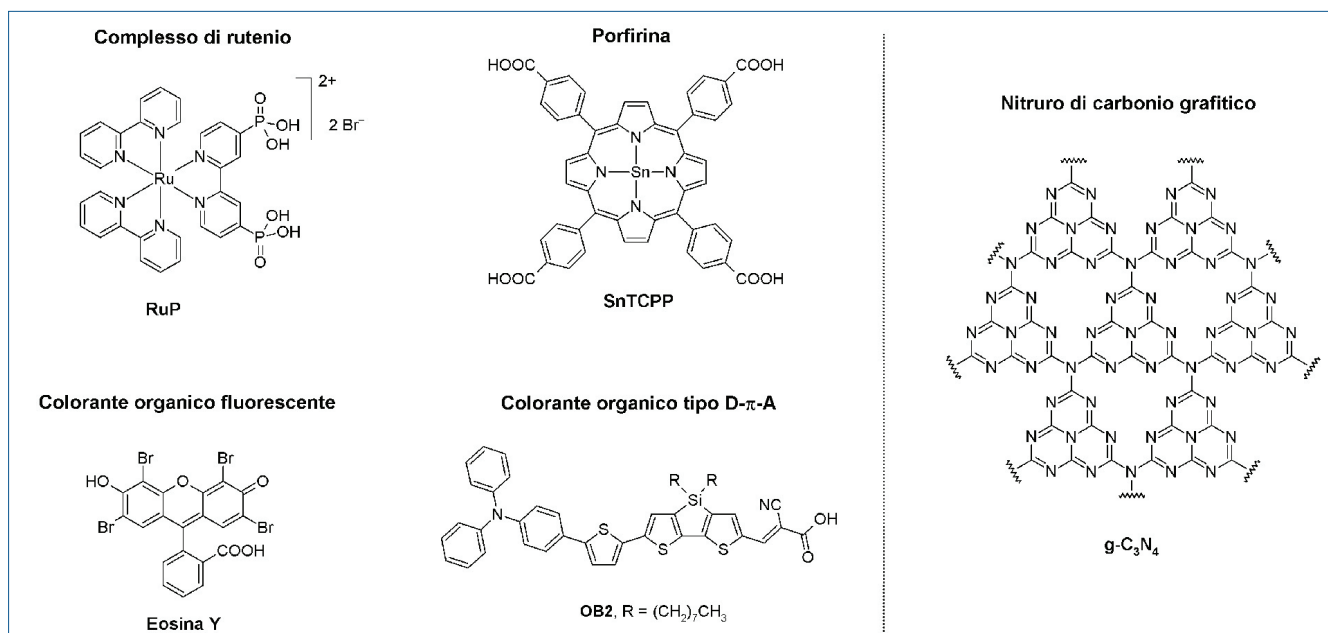


Fig. 2 - (sx) Esempi di coloranti usati in sistemi DS-PC per la produzione di H_2 ; (dx) struttura del nitruro di carbonio grafitico

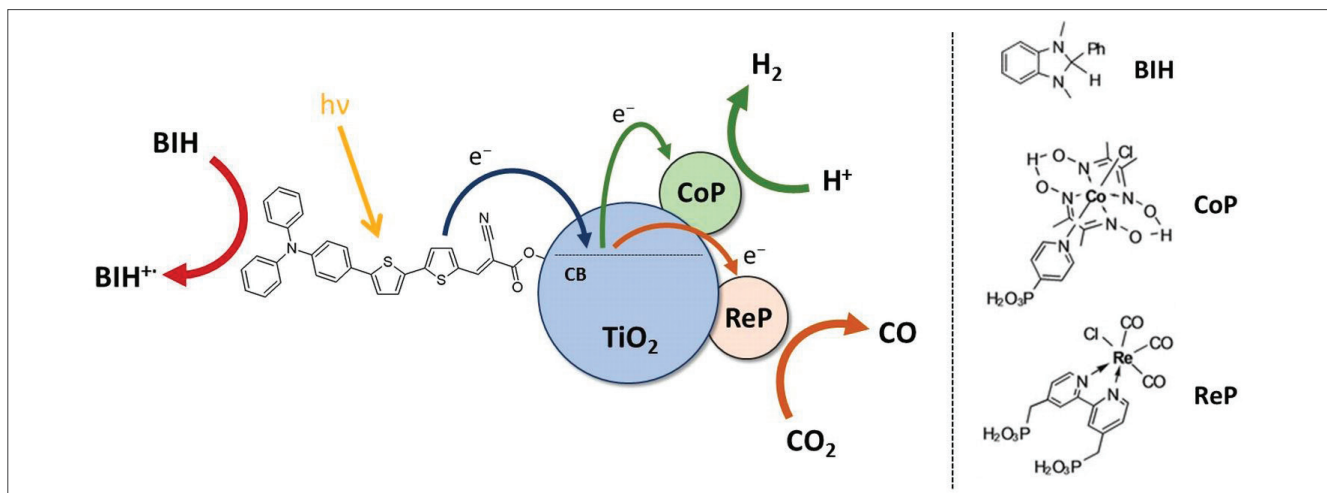


Fig. 3 - DS-PC per la produzione di syngas

teriali sia inorganici che organici, come ad esempio altre forme cristalline di TiO_2 (brookite), ossidi di altri metalli di transizione (ZnO , $\text{H}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$), oppure il nitruro di carbonio grafittico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$). Quest'ultimo è particolarmente interessante poiché permette l'adsorbimento anche di composti privi di gruppi ancoranti, che interagiscono con il substrato tramite interazioni π , ed essendo in grado esso stesso di catturare una porzione della radiazione visibile può dare facilmente luogo a fotocatalizzatori ad ampio raggio di assorbimento, dalle alte prestazioni (Fig. 2) [8].

Il catalizzatore, infine, è quasi sempre costituito da nanoparticelle metalliche adsorbite sul SC, con il platino che è la scelta più comune. Sono comunque state riportate specie differenti, a base di Fe, Co, Cu e Ni, così come complessi di metalli di transizione ancorati alla superficie del SC che, sebbene caratterizzati da prestazioni generalmente inferiori rispetto a quelle fornite dal platino, possono presentare interessanti profili di selettività. Ciò è stato recentemente dimostrato da Kang *et al.*, che hanno riportato l'uso di un sistema DS-PC formato da un colorante organico adsorbito su TiO_2 e decorato con due diversi catalizzatori a base di renio e cobalto (chiamati, rispettivamente, **ReP** e **CoP**). Lavorando in sospensione in $\text{H}_2\text{O}/\text{DMF}$ in presenza di CO_2 , ed usando la specie **BIH** come SED, gli autori hanno mostrato come sotto irraggiamento visibile fosse possibile ottenere direttamente syngas, con un rapporto modulabile tra H_2 e CO, per mezzo della riduzione selettiva di CO_2 su **ReP** e di H^+ su **CoP**, con valori di TON fino a 200 (Fig. 3) [9].

Celle fotoelettrochimiche sensibilizzate a colorante, DS-PEC

Le DS-PEC (*dye-sensitized photoelectrochemical cells*), a differenza dei sistemi DS-PC, possono produrre contemporaneamente sia energia elettrica, sia energia chimica. Quelle per *water splitting* sono composte da un fotoanodo, atto ad estrarre gli elettroni dall'acqua usando la radiazione solare come fonte energetica, e da un (foto)catodo che utilizza questi elettroni per ridurre protoni ad idrogeno molecolare. La radiazione solare può essere assorbita solo da uno o da entrambi i fotoelettrodi. Il processo elettrochimico è molto simile a quello dei sistemi fotocatalitici: in questi dispositivi almeno un elettrodo è sensibilizzato con un colorante, ovvero un fotosensibilizzatore con il compito di catturare la radiazione solare, che viene adsorbito sulla superficie del semiconduttore. Le tipologie più semplici sono formate da un solo elettrodo fotoattivo, anodo o catodo, ma vi sono esempi di DS-PEC tandem con entrambi gli elettrodi fotosensibilizzati (Fig. 4). Cercare di sviluppare una tecnologia tandem costituita sia da un fotoanodo che da un fotocatodo è l'obiettivo che si pone la ricerca sui dispositivi DS-PEC.

Nelle DS-PEC lo schema energetico è lievemente differente da quello delle DS-PC. In un sistema con solo anodo fotoattivo (Fig. 4, a sinistra), la radiazione solare incide sul colorante e ne eccita un elettrone dall'HOMO al LUMO. L'elettrone eccitato passa nella banda di conduzione del semiconduttore, posta a potenziali più positivi del LUMO del fotosen-

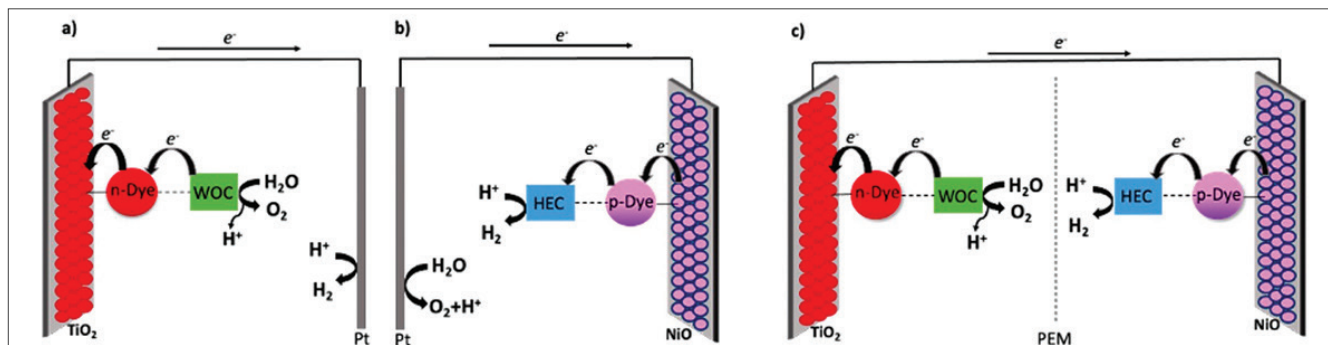
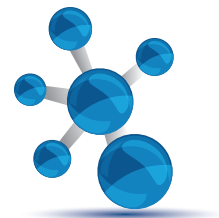


Fig. 4 - In ordine da sinistra: a) DS-PEC con anodo fotoattivo e catodo di platino; b) DS-PEC con fotocathodo e un elettrodo di platino all'anodo; c) DS-PEC tandem con entrambi gli elettrodi fotoattivi. n-dye o p-dye: fotosensibilizzatori; WOC: catalizzatore per l'ossidazione dell'acqua; HEC: catalizzatore per la reazione di formazione di idrogeno; PEM: membrana a scambio protonico

sensibilizzatore, e viene trasferito attraverso il circuito esterno al catodo. La buca che viene a formarsi sul colorante agevola l'ossidazione dell'acqua, in presenza del catalizzatore opportuno (*water oxidation catalyst*, WOC). In una DS-PEC caratterizzata da catodo fotoattivo (Fig. 4, al centro) abbiamo il processo inverso. Anche in questo caso, la radiazione incide sul colorante ad eccitare un elettrone che passa dall'HOMO al LUMO. L'elettrone eccitato passa all'HEC (*hydrogen evolution catalyst*), il cui potenziale di *onset* si trova in una posizione più bassa del LUMO del colorante, dove viene impiegato per ridurre a idrogeno i protoni presenti nella soluzione. La buca formata si passa nella banda di valenza del semiconduttore, tipicamente nichel ossido, che si trova a potenziali più negativi dell'HOMO del dye. La presenza di buche sul semiconduttore attira elettroni dal controelettrodo di platino, inducendo così l'ossidazione delle molecole di acqua a ossigeno molecolare [10].

Anche nel caso delle DS-PEC la scelta del semiconduttore è estremamente importante, ma quello che si può osservare è che la maggior parte delle celle sviluppate utilizza come semiconduttore anodico la TiO_2 e come semiconduttore catodico il NiO. Solo più recentemente, nel comparto catodico è stato studiato un semiconduttore con la struttura della delafossite a base di rame e gallio che risulta essere decisamente meno tossico del NiO comunemente usato. Altra componente fondamentale della cella, come detto, sono i catalizzatori molecolari impiegati nel processo di *water splitting* per rigenerare i sensibilizzatori. In questo campo la letteratura è vasta e complessa, quello che però emerge da una prima

analisi è che, per i WOC, i complessi più utilizzati sono quelli a base di rutenio e quelli a base di iridio. Per quello che riguarda i complessi per HEC, i sistemi più usati sono quelli a base di cobalto. Nel campo dei sensibilizzatori lo sviluppo è analogo a quello che si è visto nel campo delle celle solari sensibilizzate a colorante. Anche in questo caso tra i sistemi più studiati ci sono quelli a base di complessi di rutenio, variamente funzionalizzati, e con acidi fosfonici anziché carbossilici come ancoranti sulla superficie del semiconduttore. È infatti noto che gli acidi fosfonici siano in grado di instaurare legami più stabili con i semiconduttori in ambiente acquoso se confrontati con gli analoghi carbossilici, aumentando la stabilità del sistema sensibilizzato. Anche nel campo delle DS-PEC, i coloranti organici metal-free hanno preso piede molto rapidamente grazie alla semplicità nella sintesi e alla possibilità di modificarne agevolmente le proprietà ottiche ed elettrochimiche [11]. Oltre a questo, l'utilizzo di precursori abbondanti ed economici li rende particolarmente interessanti per uno sviluppo su larga scala. In questa categoria si possono vedere le tre principali classi utilizzate: i derivati del perilene, le porfirine e i coloranti dipolari donatore- π -accettore (D- π -A). I derivati del perilene, e più specificamente le perilendiimmidi, sono stati scelti per la loro grande stabilità e per il loro vasto uso in differenti settori. Allo stesso modo, le porfirine presentano un intenso assorbimento nel visibile e sono state largamente studiate. Tuttavia, i sistemi più studiati sono quelli di tipo donatore- π -accettore che offrono la maggiore versatilità in termini di varietà strutturale. Questi coloranti sono stati ampiamente applicati sia come sensibilizzatori anodici,



sia come sensibilizzatori catodici. Alcuni esempi particolarmente rilevanti nella categoria sono quelli riportati da Meyer e collaboratori cosensibilizzando un fotoanodo con un complesso di rutenio insieme a una serie di coloranti lineari D- π -A, riportando efficienze faradaiche prossime al 100% nel processo di ossidazione dell'acqua [12]. Coloranti D(- π -A)₂ sono stati efficacemente impiegati sia in fotoossidazione che in fotoriduzione dell'acqua. Abbotto e collaboratori hanno presentato uno studio sull'effetto indotto dal differente donatore in coloranti per la fotoossidazione dell'acqua con efficienze faradaiche di circa il 70% [13], mentre Sun e collaboratori hanno presentato il colorante **P1** che è considerato il colorante di riferimento per la fotoriduzione dell'acqua [14]. La grande versatilità di queste strutture ha permesso di sintetizzare sistemi sempre più integrati fino a realizzare quelle che vengono definite "diadi sensibilizzatore-catalizzatore", in cui queste due fondamentali componenti del sistema fotosintetico sono chimicamente legate l'una all'altra. In questo modo viene massimizzato il trasferimento elettronico e vengono migliorate la stabilità e l'efficienza del sistema. Tra questi sistemi è utile ricordare quello realizzato da Artero e collaboratori per la parte di fotoriduzione [15] e quello da Abbotto e collaboratori per la parte di ossidazione dell'acqua (Fig. 5) [16].

Per raggiungere l'obiettivo finale di un dispositivo in grado di scindere l'acqua in ossigeno e idrogeno è però necessario combinare i due fotoelettrodi in un sistema in grado di effettuare attivamente i due processi di riduzione e ossidazione. Questo porta ad un problema principale, che è legato alla differente densità di corrente prodotta dai due fotoelettrodi. Esistono pochissimi esempi di dispositivi tandem, con entrambi gli elettrodi attivi. Il primo di questi, sensibilizzato con coloranti organici metal-free, è

stato presentato da Sun nel 2015 con buoni risultati [17]. Un ultimo importante punto da evidenziare è che questi dispositivi possono essere utilizzati anche per ridurre la CO₂ a prodotti ad alto valore aggiunto (CO, formaldeide, acido formico, metanolo ecc.) semplicemente cambiando il catalizzatore nel comparto catodico. Infatti, sostituendo i complessi a base di cobalto con complessi a base di renio o nichel, è possibile ridurre selettivamente la CO₂ anziché i protoni. Lo sviluppo di catalizzatori molecolari per la riduzione dell'anidride carbonica è, senza dubbio, una delle sfide del prossimo futuro [18].

Conclusioni

Nel campo della fotosintesi artificiale, i sistemi fotocatalitici e fotoelettrochimici sensibilizzati a colorante stanno riscuotendo molto interesse nella comunità scientifica, dal momento che costituiscono alternative promettenti agli elettrolizzatori per convertire l'energia solare in un vettore facilmente immagazzinabile ed utilizzabile come l'idrogeno. Le comuni tecniche di sintesi di materiali organici hanno permesso di preparare coloranti capaci di modulare le proprietà ottiche ed elettrochimiche dei dispositivi risultanti, permettendo di migliorarne sensibilmente le prestazioni in termini di conversione della luce solare. Lo studio di nuovi materiali (sensibilizzatori e catalizzatori) a base organica è senza dubbio uno dei metodi più efficaci per rendere DS-PC e DS-PEC accessibili e soprattutto applicabili nella produzione di idrogeno, o più in generale di combustibili solari, a basso costo e in maniera diretta dal sole e dall'acqua. Al momento il più grande scoglio da superare è la stabilità, ancora limitata, di questi sistemi, che è pertanto un aspetto centrale di numerosi studi avanzati attualmente in corso. Tuttavia, grazie al fervente lavoro di molti gruppi di ricerca,

ulteriori progressi saranno sicuramente ottenuti, con la prospettiva di raggiungere i requisiti necessari per rendere queste tecnologie applicabili su scala industriale entro i prossimi tre decenni.

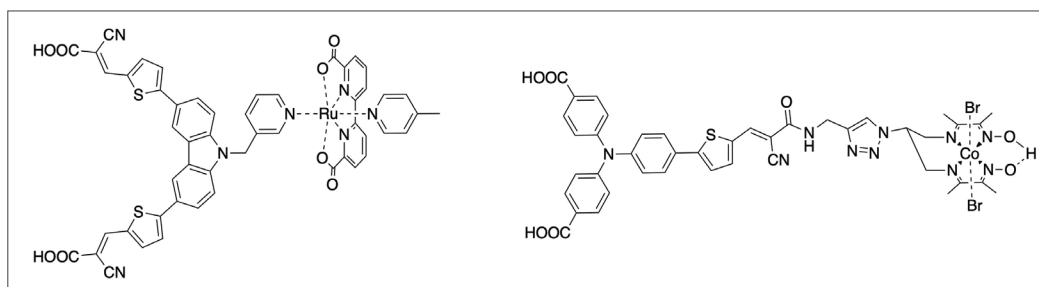


Fig. 5 - Esempi di diadi coloranti-catalizzatore per ossidazione (sinistra) e riduzione (destra) dell'acqua

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Fujishima, K. Honda, *Nature*, 1972, **238**, 37.
- [2] Z. Wang, C. Li, K. Domen, *Chem. Soc. Rev.*, 2019, **48**, 2109.
- [3] A. Hagfeldt, G. Boschloo *et al.*, *Chem. Rev.*, 2010, **110**, 6595.
- [4] G. Reginato, L. Zani *et al.*, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2020, 899.
- [5] X. Zhang, T. Peng, S. Song, *J. Mater. Chem. A*, 2016, **4**, 2365.
- [6] B. Cecconi, N. Manfredi *et al.*, *Eur. J. Org. Chem.*, 2016, 5194.
- [7] A. Dessì, M. Monai *et al.*, *ChemSusChem*, 2018, **11**, 793.
- [8] J. Wang, Y. Zheng *et al.*, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2017, **5**, 7549.
- [9] J.-S. Lee, D.-I. Won *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, **56**, 976.
- [10] S. Yun, N. Vlachopoulos *et al.*, *Chem. Soc. Rev.*, 2019, **48**, 3705.
- [11] C. Decavoli, C.L. Boldrini *et al.*, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2020, 978.
- [12] D. Wang, J. Hu *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2020, **117**, 202001753.
- [13] N. Manfredi, C.L. Boldrini, A. Abbotto, *ChemElectroChem*, 2018, **5**, 2395.
- [14] L. Li, L. Duan *et al.*, *Chem. Commun.*, 2012, **48**, 988.
- [15] N. Kaeffer, J. Massin *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2016, **138**, 12308.
- [16] C. Decavoli, C.L. Boldrini *et al.*, *RSC Adv.*, 2021, **11**, 5311.
- [17] F. Li, K. Fan *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, **137**, 9153.
- [18] E. Boutin, L. Merakeb *et al.*, *Chem. Soc. Rev.*, 2020, **49**, 5772.

Artificial Photosynthesis with Organic Dyes for Sustainable Production of Fuels

Hydrogen production by means of water photolysis (“artificial photosynthesis”) represents a promising method to convert solar energy into an easy-to-store chemical vector. This article presents a brief overview of photocatalytic and photoelectrochemical systems for artificial photosynthesis, making use of organic dyes as sensitizers towards visible light absorption.

LIBRI E RIVISTE SCI

Targets in Heterocyclic Systems Vol. 24

È disponibile il 24° volume della serie “Targets in Heterocyclic Systems”, a cura di Orazio A. Attanasi, Bortolo Gabriele, Pedro Merino e Domenico Spinelli

http://www.soc.chim.it/it/libri_collane/th/s/vol_24_2020

Sono disponibili anche i volumi 1-23 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

