

## Smart windows elettrocromiche

Una panoramica delle attuali attività di ricerca relative alle finestre intelligenti, con particolare riferimento alle nuove tendenze e ai potenziali vantaggi per il risparmio energetico e il comfort visivo derivanti dall'integrazione nell'edificio.

### ELECTROCHROMISM FOR SMART WINDOWS

An overview of current research activities dealing with smart windows with special reference to new trends and potential energy saving and visual comfort advantages deriving from their building integration.

La trasparenza delle vetrate garantisce una continua interazione visuale tra spazio confinato e ambiente circostante. Ciò rappresenta innegabilmente una peculiarità del materiale vetro, sotto il profilo estetico e funzionale, consentendo di impiegare la luce naturale come fonte di illuminazione; è stato dimostrato che l'interazione visuale con l'ambiente circostante, oltre ad esaltare la qualità architettonica dello spazio confinato, consente l'ulteriore beneficio del contatto con il daylighting, radiazione luminosa ad elevatissima qualità spettrale, con ricadute positive sulla salute (fotosintesi della vitamina D, attivazione degli interruttori ormonali per melatonina e serotonina, riduzione dei tempi di convalescenza nei nosocomi, riduzione insorgenza di patologie quali l'osteoporosi) [1]; nondimeno, la vetratura costituisce, come ben noto a progettisti e utenti, il principale punto debole dell'involucro, dal punto di vista termofisico.

L'innovazione e la ricerca propongono sempre di più soluzioni tecnologiche atte a rispondere a molteplici esigenze, tra cui quella della modulazione variabile della radiazione solare, caratteristica che è implementabile nell'involucro grazie proprio ai dispositivi elettrocromici. Questo ambito di ricerca si innesta nella lunga storia dell'integrazione del vetro nell'involucro edilizio, che ha subito un'accelerazione significativa in tempi piuttosto recenti e beneficia significativamente della disponibilità di materiali e strumenti innovativi provenienti dal campo delle nanotecnologie.

Nel XIX e nel XX secolo, la vetratura è assunta a un ruolo centrale nel linguaggio espressivo dell'architettura (parallelamente a evoluzioni tecnologiche che hanno consentito la diffusione di tempratura, float glass e la produzione di vetri stratificati). Nel Novecento, si è pervenuti alla codifica del curtain wall, o facciata continua in vetro: uno dei cinque punti fondamentali dell'architettura di Le Corbusier. Si pensi al progetto di Mies van der Rohe per il Seagram Building (1958), un edificio a torre, in cui si concretizzava il sogno di una facciata interamente in vetro. Parte dei pannelli vetrati, drogata con selenio, consentiva di ottenere elementi dal colore cangiante sotto la luce solare, dal rosa al blu, fino al bronzo. Questa ardita sperimentazione architettonica può considerarsi uno dei primi design di "pelle" architettonica, in cui la permeabilità visiva perde la sua fissità, per acquisire proprietà dinamiche, cangianti. L'involucro

diventa la "terza pelle" per il fruitore (sovrapponendosi a derma e abbigliamento) [2]. Nell'ottica del miglioramento delle proprietà termiche delle finestrate sono stati introdotti, più recentemente, i vetri basso-emissivi, ossia dotati di rivestimenti superficiali di materiali in grado di controllare l'emissività della superficie del pannello e contenere la dispersione di energia termica per irraggiamento tra le facce del vetro-camera affacciate sull'intercapedine (evacuate o contenenti gas inerti). Analoga soluzione, che prevede sempre l'impiego di film sottili, è quella dei vetri a controllo solare, atti a contenere l'aliquota di trasmissione della radiazione attraverso il vetro. Questi ultimi, con un impiego prevalentemente estivo, per la riduzione del cosiddetto greenhouse effect sono generalmente soft coating ottenuti per magnetron sputtering di un sottile film di argento, ad esempio. I primi, invece, depositati per pirolisi sul vetro quando ancora giace sul letto di stagno fuso nel processo di produzione float glass, sono hard coatings di ossido di stagno. L'applicazione di film sottili di spessore nanometrico mediante tecniche di deposizione fisica in alto vuoto può considerarsi una delle prime applicazioni delle nanotecnologie in edilizia. Il grosso limite di questo approccio risiede nel fatto che la deposizione dei film sottili sancisce in modo definitivo il comportamento termofisico di una vetratura con riferimento alla trasmissione di radiazione elettromagnetica. In tutti i casi, la trasparenza del vetro, dopo le opportune deposizioni, assume il carattere di una proprietà fissa e non modificabile del pannello vetrato, definita a priori in fase di produzione per offrire i requisiti richiesti dai progettisti.

Con lo scopo di reinterpretare dinamicamente la "trasparenza" del vetro, mirando a farne una proprietà mutevole e in relazione alle condizioni esterne di illuminamento, nasce l'ambito di ricerca sperimentale delle "smart windows". Esse hanno l'obiettivo progettuale di una "membrana adattiva", in grado di instaurare un continuo dialogo con l'ambiente circostante e mutare specifiche proprietà in risposta al variare delle condizioni ambientali circostanti, così da conseguire, con continuità, condizioni di comfort abitativo indoor in termini termici e di visual comfort, al contempo. Le smart windows sono principalmente basate sull'impiego di materiali e dispositivi cromogenici. Si tratta di una particolare gamma di materiali responsivi, o smart, in grado di veder mutate delle specifiche caratteristiche cromatiche in ragione

della variazione di uno stimolo esterno specifico: elettrico (elettrocromici), luminoso (fotocromici), termico (termocromici). Queste tecnologie consentono di modificare dinamicamente e in modalità adattiva le proprietà di trasmissione del vetro. Il quale consente l'attraversamento a radiazioni elettromagnetiche aventi lunghezze d'onda comprese tra 315 nm e 3000 nm.

Il principale obiettivo dei sistemi elettrocromici è infatti il controllo dinamico del fattore di trasmissione solare  $g$ , che esprime il rapporto tra l'energia termica globalmente trasmessa dalla lastra e quella incidente su di essa; infatti questi dispositivi consentono una modulazione arbitraria delle proprietà spettrali in risposta all'applicazione di una tensione elettrica esterna ad un preciso valore.

Nelle regioni climatiche in cui si abbiano elevati consumi di energia elettrica per via delle elevate superfici finestrate, le tecnologie elettrocromiche, ormai sul mercato, possono offrire una serie di benefici significativi in termini di risparmio energetico, attraverso una modifica del livello di trasmissione visiva.

Giova ricordare che specifici studi apparsi in letteratura scientifica hanno dimostrato come i benefici derivanti dal controllo solare di una finestra elettrocromica siano maggiori rispetto alla produzione di energia che si otterrebbe applicando sulla medesima superficie un sistema fotovoltaico, di pari area. Circa 170 kWh/m<sup>2</sup>anno, alle nostre latitudini [3]. L'entità di tale beneficio può essere amplificata nel momento in cui la strategia di utilizzo del sistema cromogenico, anziché essere affidata all'utenza, risultasse gestita in tempo reale mediante uno spontaneo adattamento delle proprietà spettrali, in base alla variabilità delle condizioni ambientali circostanti, in un continuo dialogo tra le grandezze fisiche coinvolte (ad esempio, irraggiamento e tensione applicata al device elettrocromico).

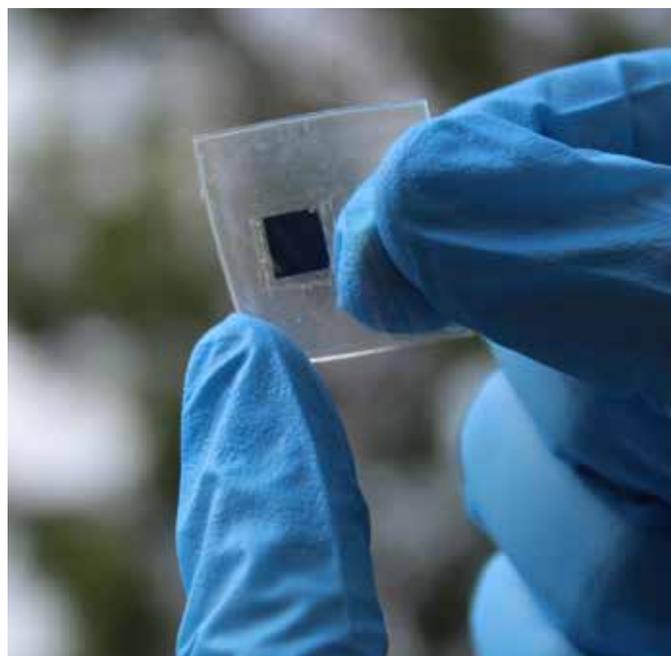
Il risparmio energetico derivante dall'impiego virtuoso di una smart

window come sistema vetrato con schermatura integrata deriva essenzialmente dalla contemporanea riduzione di energia elettrica per il raffrescamento in regime estivo e la riduzione dell'impiego di energia elettrica per l'illuminazione artificiale quando, ad esempio, si fosse costretti ad attivare schermature totali tradizionali in presenza di fenomeni di discomfort visivo da sovrailluminamento ed abbagliamento. Secondo C.G. Granqvist [4], tali riduzioni ammonterebbero ad almeno 30 kWh/m<sup>2</sup> anno in termini di riduzione dei costi di raffrescamento e circa 20 kWh/m<sup>2</sup> per energia elettrica per usi illuminotecnici [5]. Secondo A. Azens, in date condizioni di esposizione e climatiche, il risparmio energetico ottenibile impiegando vetri elettrocromici, rispetto allo scenario in cui venga impiegata un comune vetrocamera potrebbe raggiungere valori minimi dell'ordine di 170 kWh/m<sup>2</sup> per anno [3].

L'elettrocromismo, come già specificato è il fenomeno che permette il cambiamento di colore di una precisa gamma di materiali, detti elettrocromici, attraverso l'applicazione di una tensione esterna. Si osserva sia in alcuni materiali organici che inorganici. Tra i più diffusi vi sono alcuni ossidi di materiali come il tungsteno, il vanadio, il molibdeno, il nichel. In particolare, uno dei materiali elettrocromici catodici più utilizzati è il triossido di tungsteno (WO<sub>3</sub>) definito in letteratura scientifica come un mixed conductor, ossia un ossido in grado di offrire conduzione ionica ed elettronica al contempo, in precise condizioni [6]. Il WO<sub>3</sub> è un materiale che si organizza sotto forma di ottaedri, con atomi di tungsteno in posizione centrale, e ossigeno in posizione periferica. Alla mutua disposizione degli ottaedri, che condividono spigoli o vertici, si deve la formazione di un gran numero di canali vuoti. La presenza di tali canali, detti "tunnel", costituisce la via di accesso per l'intercalazione di piccoli cationi, come protoni, ioni litio o, anche, sodio.

È stato dimostrato che la reazione redox di colorazione e decolorazione del triossido di tungsteno si innesca a seguito di un'iniezione di elettroni

**FIGURA 1 - Dispositivo elettrocromico stato solido su singolo substrato flessibile realizzato presso i laboratori CNR di Lecce**



e una contemporanea intercalazione di piccoli cationi, che determina un'alterazione del bandgap del materiale; il quale, trasparente in condizioni normali, subisce una transizione ottica fino ad assumere una colorazione blu scuro, per significativi livelli di intercalazione cationica (espresso dal rapporto  $x=Li/W$ ). Come anticipato, tale variazione si deve all'iniezione di elettroni sui siti di tungsteno, che variano il proprio stato di ossidazione, riducendosi da +6 a +5. Così, il fotone incidente avrà energia sufficiente a consentire una transizione di elettroni localizzati tra siti di tungsteno vicini, e tale impiego di energia spiega la variazione di assorbimento ottico anzidetta.

Una tipica architettura di dispositivi elettrocromici prevede l'impiego di due elettrodi in vetro o materiale plastico (e.g. poliestere, polietilene), resi conduttivi mediante ossidi conduttivi trasparenti (prevalentemente  $In_2O_3:Sn$  o  $SnO_2:F$ ). Su di essi vengono depositati due materiali elettrocromici dal funzionamento complementare, tipicamente ossido di tungsteno (a colorazione catodica) e ossido di nichel (a colorazione anodica). Tra i due elettrodi, così configurati viene inserito un elettrolita, liquido o gel, al quale viene affidata la conduzione ionica dei cationi presenti. Il collegamento elettrico tra i due elettrodi avviene mediante una circuiteria esterna che consente l'applicazione di una tensione che agisce da driving force per l'attivazione della colorazione e decolorazione del device. La formulazione dell'elettrolita più impiegata in letteratura scientifica è quella che prevede l'impiego di un sale di litio perclorato in carbonato di propilene. In realtà, lo studio della idonea formulazione della soluzione elettrolitica, è di fondamentale importanza per garantire la durabilità del sistema, specialmente in vista dell'impiego industriale delle smart windows. Infatti, i più moderni trend nel design di dispositivi elettrocromici puntano all'impiego di sistemi completamente a stato solido. Tra i vari approcci è utile citare il tentativo di utilizzare il device elettrocromico, depositato su supporti trasparenti di poliestere, come sistema di laminazione tra vetri. [7]. In questo caso il device elettrocromico si configura come idoneo componente per la laminazione dei vetri stratificati di sicurezza. Aggiungendo la proprietà della modulazione cromatica.

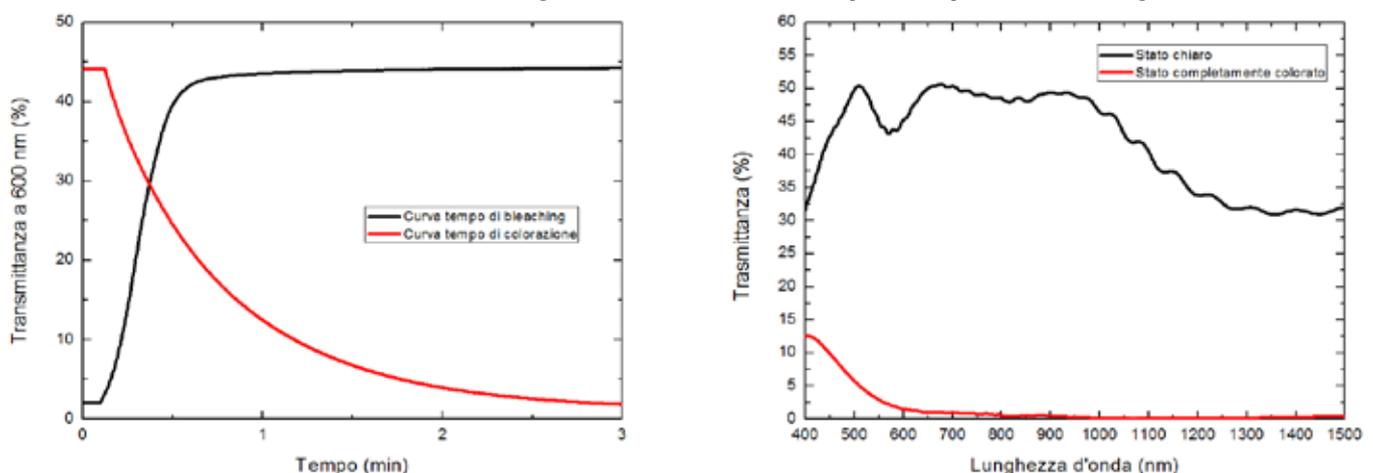
In particolare, tra le attività in corso presso il Laboratorio Nazionale di Nanotecnologia (CNR Nanotec), vi è proprio la realizzazione di dispositivi cromogenici a stato completamente solido, in grado di modulare

il proprio colore in risposta a uno stimolo esterno, di natura elettrica. Sono attualmente sperimentati, nel gruppo di ricerca del Prof. Giuseppe Gigli, device elettrocromici su singolo substrato (Figura 1) contenenti membrane elettrolitiche solide, ad elevata conduzione ionica, dotate di elevate performance e stabilità elettrochimica (Figura 2). La stabilità del sistema e la facile integrazione nella struttura dell'infisso sono due punti di forza delle attività di ricerca in corso [8].

Un gruppo di ricercatori del Politecnico di Bari indaga sugli effetti della building integration di dispositivi elettrocromici innovativi in edifici, puntando a individuare gli effetti – a livello edificio - in termini di risparmio energetico, (riduzione dei costi di raffrescamento e illuminazione artificiale), benefici in termini di ottimizzazione del daylighting e life-cycle assessment.

Il settore applicativo di elezione per le smart windows elettrocromiche è decisamente quello delle costruzioni. Esistono, tuttavia, interessanti applicazioni nell'ambito dell'automotive (specchietti retrovisori) e dell'aeronautica (sono elettrocromici i finestrini dei nuovi Boeing 787). In ambito edile occorre citare la SageGlass. Una delle prime applicazioni del vetro elettrocromico è stata realizzata qualche mese fa al Multicomfort Habitat Lab, inaugurato da Saint-Gobain Italia, a Corsico (MI); il sistema elettrocromico è stato inserito nei tripli vetri delle facciate e delle porte esterne. È il caso di ricordare che i vantaggi derivanti dall'impiego di un vetro elettrocromico comprendono – al contempo – la riduzione di costi per il raffrescamento estivo e la riduzione del ricorso all'illuminazione artificiale quando, in condizioni di discomfort visivo derivante da abbagliamento e sovrailluminamento, si debba ricorrere ai sistemi di schermatura che impongono il ricorso all'illuminazione artificiale. Gli attuali costi, ancora elevati, della tecnologia, secondo le previsioni di Lee [9] possono scendere al di sotto dei 100 dollari al metro quadro, in un mercato maturo. I vantaggi economici derivanti dall'impiego delle finestre elettrocromiche nel caso di ristrutturazione in edifici di area Mediterranea sono stati illustrati in un lavoro di Tavares [10] del 2014. Sbar et al. [11] hanno dimostrato che i vetri elettrocromici impiegati negli edifici per uffici possono portare a una riduzione del 35% nelle nuove costruzioni e fino al 50% nei lavori di ristrutturazione. Spetta, dunque, ai progettisti, offrire alle committenze una sufficiente consapevolezza dei vantaggi molteplici – ambiente, comfort indoor, energy saving – derivanti

**FIGURA 2 - Cinetiche di colorazione/bleaching e contrasto ottico del dispositivo presentato in Figura 1**



dall'impiego delle finestre elettrocromiche. Tali vantaggi possono essere calcolati con una stima del valore attualizzato netto (VAN) di una serie di flussi di risparmio energetico, che tengano conto opportunamente di tutti i risparmi ottenibili e di un realistico scenario di aumento del costo della fonte energetica impiegata. Inoltre, il processo di fabbricazione di tali device avviene interamente in condizioni di temperatura ambiente, lasciando prefigurare bassi costi di produzione e una agevole applicazione su qualsiasi tipologia di substrato. Ciò consente di ampliare notevolmente il potenziale raggio di applicazione della tecnologia in corso di studio presso il Laboratorio, non limitandolo a quello pur rilevante dell'efficienza energetica in edilizia.

### RIFERIMENTI

- [1] M. Boubekri, Daylighting, Architecture and Health, ISBN-13: 978-0750667241 ISBN-10: 0750667249.
- [2] S. Roaf, D. Crichton, N. Fergus, Adapting Buildings and Cities for Climate Change: A 21st Century Survival Guide, Paperback, 2005.
- [3] A. Azens, C. Granqvist, Electrochromic smart windows: energy efficiency and device aspects, Journal of Solid State Electrochemistry, February 2003, Volume 7, Issue 2, pp 64-68
- [4] Granqvist et al. Journal of Vacuum Science & Technology B 32, 060801 (2014)
- [5] Oxide electrochromics: An introduction to devices and materials Granqvist, C. G. 2012, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 99, April 2012, Pages 1-13
- [6] C.G. Granqvist, P.C.Lansaker, N.R.Mlyuka, G.A.Niklasson, E.Avendano Progress in chromogenics: New results for electrochromic and thermochromic materials and devices. Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 2032-2039.
- [7] Claes G. Granqvist, Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices, Volume 564, 1 August 2014, Pages 1-38.
- [8] P. Cossari, A. Cannavale, S. Gambino, G. Gigli, Room temperature processing for solid-state electrochromic devices on single substrate: From glass to flexible plastic, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 155, October 2016, Pages 411-420.
- [9] Lee, E. S., and D. L. Di Bartolomeo, Application Issues for Large-Area Electrochromic Windows for Commercial Buildings, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, 71, 465-491.
- [10] P.F. Tavares, A.R. Gaspar, A.G. Martins, F. Frontini, Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates, Energy Policy, Volume 67, April 2014, Pages 68-81.
- [11] N.L. Sbar, L. Podbelski, H. M. Yang, B. Pease, Electrochromic dynamic windows for office buildings, International Journal of Sustainable Built Environment, Volume 1, Issue 1, June 2012, Pages 125-139.



**LE TECNOLOGIE DI COGENERAZIONE**  
3700 unità di cogenerazione, esportazione in 40 paesi mondiali

**METANO - BIOGAS - LPG | 7 kW - 10 MW**

25 anni sul mercato

[www.tedom.com](http://www.tedom.com)