

## SISTEME VITRATE DINAMICE PENTRU CLĂDIRILE NZEB Partea a II-a. Caracterizare sisteme vitrate dinamice

*Victoria COTOROBAI\**,  
*Iulia NEGARĂ\*\**,  
*Ioan-Cristian COTOROBAI\*\*\**

*\*Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi,*

*\*\*Universitatea Tehnică a Moldovei,*

*\*\*\*S.C. DAS Instalații, Iași*

Fereastra viitorului, emergentă în tehnologiile sistemelor vitrate actuale are la bază un nou concept. Aceasta nu mai este doar o simplă bucată de sticlă acoperită integrată în perete ci devine „**aparate multifuncțional integrate în perete**”. Aceste sisteme vitrate, dinamice, *includ ferestre comutabile și/sau sisteme de umbrire mobile, cum ar fi învelișuri electrocromice sau gazocromice comutabile și sisteme de fațade duble ventilate/FDV/, cu proprietăți optice și termice variabile, în raport cu clima, preferințele ocupanților, sistemul de construcție, cerințele impuse clădirilor.* Specialiștii în domeniu [John Carmody and colab., ] au demonstrat că prin gestionarea activă a iluminatului și răcirii, ferestrele inteligente ar putea contribui la: reducerea necesarului de energie electrică în orele de vârf cu 20-40% în multe dintre clădirile rezidențiale, de birouri și chiar comerciale; pot asigura iluminatul natural pentru mai mult timp; pot îmbunătăți confortul și pot spori productivitatea în case și birouri. Aceste tehnologii pot oferi o flexibilitate maximă în gestionarea cererii variabile și a consumului de energie, în clădiri dar și în mediul de utilități emergent conform actualelor reglementări. Aceste sisteme oferă comunității de construcții mijloace de răspuns la exigențele ecologice actuale (impact minim asupra mediului: resurse minime utilizate; efecte minime asupra mediului).

O fereastră ideală ar trebui să aibă proprietăți optice adaptabile facil la schimbarea condițiilor climatice sau a preferințelor ocupanților, oferind un răspuns care să permită reducerea consumului de energie. Cercetătorii au lucrat deja la noile tehnologii de geamuri pentru următoarea generație de ferestre inteligente. După mulți ani de dezvoltare, diverse tehnologii de ferestre comutabile au trecut fazele de testare a prototipului și unele au început să fie disponibile comercial.

Există două tipuri de bază de ferestre comutabile - *dispozitive pasive* care răspund direct la o singură variabilă de mediu, cum ar fi nivelul de lumină sau temperatură, și *dispozitive active* care pot fi controlate direct ca răspuns la orice variabilă, cum ar fi preferințele ocupanților sau cerințele sistemului de încălzire și răcire. Dispozitivele pasive includ

sticlele fotocromice și termocromice; iar *dispozitivele active* includ sticlele cu cristale lichide, particule suspendate și electrocromice.

- **Fereastra termocromică**

Această tehnologie este cea mai avansată și cea mai simplă de realizat tehnologie dinamică. Este disponibilă în prezent pe piață. Ferestrele termocromice sunt instalate în multe clădiri rezidențiale și comerciale din întreaga lume.

Sticla termocromă folosește pur și simplu căldura din lumina directă a soarelui pentru nuanțarea ferestrelor atunci când este necesar. Ferestrele termocromice (TCW) își pot schimba culoarea de la o stare clară la întunecată în funcție de temperatură. De fapt, aceste tipuri de ferestre au capacitatea de a modula lumina și căldura solară transmisă prin fereastră în funcție de temperatura și radiația solară directă (Tällberg, și colab., 2019). Cu cât lumina soarelui este mai directă și mai intensă pe sticlă, cu atât sticla va deveni mai întunecată. Acest lucru permite ferestrelor să reducă substanțial aportul de căldură care intră vara în clădire și deoarece transmisia prin sticlă se adaptează continuu pe o gamă de temperaturi, se realizează un echilibru natural și o utilizare maximă a luminii naturale. Printr-un design adecvat, ferestrele termocromice contribuie la reducerea orbirii, decolorării și zgomotului și sporesc siguranța.

În alcătuirea unei astfel de ferestre intră un strat de material termocrom plasat între două geamuri de sticlă. Peste un anumit prag de temperatură, apare o nuanță metalică și materialul termocrom reflectă radiațiile infraroșii. Consecința este că aporturile solare sunt controlate în perioada de vară și permit reducerea necesarului de răcire. Prin utilizarea acestui tip de tehnologie, performanțele ferestrei depind în totalitate de condițiile climatice exterioare. Astfel, oxizii de metal sunt folosiți mai ales pentru construirea fațadelor. Pentru aplicațiile din construcții se utilizează de regulă VO<sub>2</sub> dopat cu ioni de tungsten sau cu fluor pentru a regla tranziția de temperatură a acestui oxid de metal. De obicei, în apropierea geamului interior se amplasează un strat de emisivitate scăzută (Costanzo, Evola și Marletta, 2016).

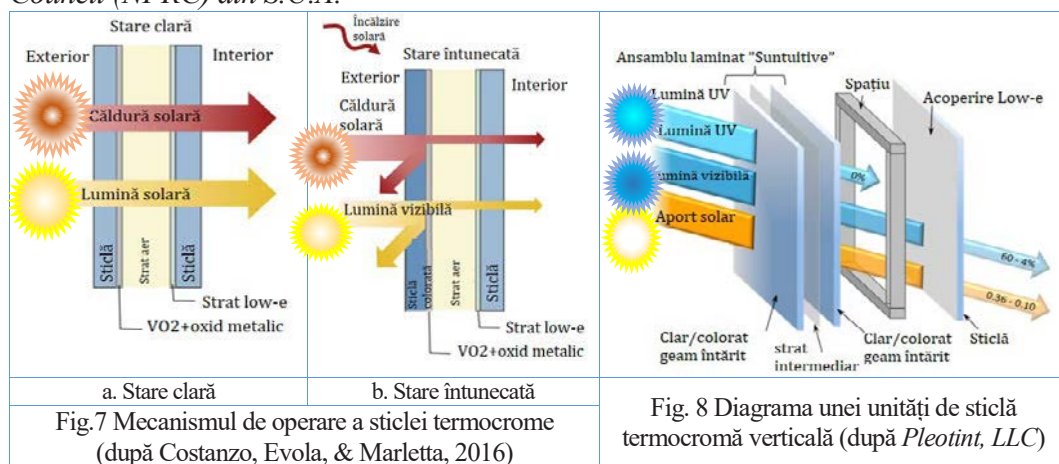
**Notă:** Ferestrele termocromice au de fapt în alcătuirea lor un strat intermediar de siguranță obișnuit, realizat din extrudarea materialelor termocromice speciale în polivinil butirial (PVB), laminate între două bucăți de sticlă termoizolată sau temperată și plasate într-o unitate de sticlă izolată (IGU) cu o acoperire cu emisivitate scăzută. De asemenea, se recomandă un distanțier pentru marginile calde. Datorită designului laminat, un laminat din sticlă termocromă poate fi utilizat ca element de construcție pentru a îndeplini majoritatea codurilor de construcție și a cerințelor de proiectare. Stratul intermediar poate fi laminat la aproape orice nuanță sau grosime a sticlei și poate fi utilizat cu straturi de înaltă performanță Low-e și sticlă specială. Ferestrele, ușile și luminatoarele operabile sau fixe pot fi realizate cu ajutorul sticlei termocromice.

În Figura 7 este prezentat modul de funcționare al geamului termochrom conform (Costanzo, 2016). Diagrama unei unități tipice de sticlă izolată, amplasată în poziție verticală pentru o fereastră termocromă "Suntuitive®" este prezentată în Figura 8. Ferestrele termocromice pot ajuta la gestionarea nevoilor clădirii de aporturi pasive de căldură solară și lumină naturală, nevoi extrem de schimbătoare. Deci se pot reduce

costurile asociate cu încălzirea, aerul condiționat și iluminatul artificial. Ferestrele termocromice nu necesită fire, surse de alimentare sau echipamente de control și pot fi instalate de către antreprenorii de geamuri, la fel ca ferestrele convenționale. Aceste caracteristici, împreună cu un cost mai mic, fac ferestrele termocromice extrem de atractive în comparație cu abordările electrocromice sau alte tipuri de ferestre cu nuanțe variabile.

**Exemplu:** O unitate de sticlă izolată transparent care încorporează un laminat termocrom și acoperire Low-e poate avea o transmisie de lumină vizibilă între 54% și 8%, un coeficient de câștig de căldură solară de la 0,36 și 0,16 și o valoare U de 0,24. Performanța poate fi aleasă prin selectarea diferitelor nuanțe de sticlă, acoperiri Low-e și spații de aer. Ferestrele nuanțează pur și simplu, la un nivel dorit, pe baza expunerii la soare în fiecare zi a anului, în orice moment al zilei și pentru orice orientare a clădirii.

Ferestrele termocromice sau Suntuitive® Glass, sunt disponibile comercial din 2010 de la Pleotint, LLC. Începând cu mijlocul anului 2015, unitățile cu dimensiunile de 1.6 m x 3.6 m au fost produse cu strat intermediar termocrom și instalate în întreaga lume. Datele pentru stratul intermediar Suntuitive sunt disponibile în baza de date internațională de geamuri (IGDB), iar evaluările sunt disponibile prin *National Fenestration Rating Council (NFRC) din S.U.A.*



### Observații:

- Există ferestre care se schimbă între împrăștierea clară și lumina în raport cu schimbarea temperaturii. Procesul de schimbare este determinat de materiale cu schimbare de fază la temperatura critică a soluției mai scăzute (LCST). Acestea au fost denumite în trecut în mod impropriu termocromice dar ele sunt de fapt termotrope, deoarece există o schimbare de fază sau o modificare a stării materialelor și nu există nicio schimbare cromatică în aceste sisteme.
- De asemenea există sisteme bazate pe cristale lichide între polarizatoare numite uneori termocromice, dar aceste sisteme cu cristale lichide sunt, de asemenea, mai bine descrise ca fiind termotrope.

### • Ferestre electrocromice

Cea mai promițătoare tehnologie de comutare a ferestrelor este *ferestra electrocromică/ electrochromic window (EC/ ECW)*. Ferestrele electrocromice sunt capabile să-și schimbe culoarea de la o stare limpede la una întunecată prin reacții de reducere sau oxidare ca răspuns la stimulii electrici externi. Acest lucru va ajuta la

reducerea luminii și a căldurii solare transmise prin geam. Vitrajul electrocromic este format din cinci straturi Figura 10.

Acestea sunt compuse din (Casini, 2018):

- Stratul exterior realizat din oxid conductiv transparent
- Strat de acumulare de electroni care acționează ca un contraelectrod ( $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$ )
- Strat de conductor ionic sau electrolit (de obicei  $\text{LiAlF}_4$ )
- Stratul de electrod (de obicei  $\text{WO}_3$  sau  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )
- Stratul exterior realizat din oxid conductiv transparent

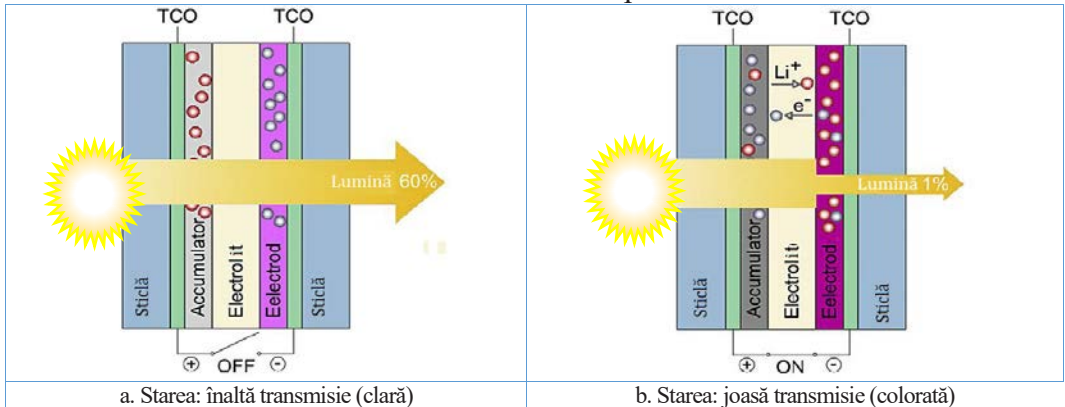


Fig. 10. Diagrama schematică de operare a unei sticle electrocrome (Casini, 2018)

Filmul electrocromic se depune pe un substrat de sticlă și are de obicei o grosime de aproximativ un micron (subțire). Stiva este formată din acoperiri de oxid metalic ceramic cu trei straturi electrocromice intercalate între doi conductori electricei transparenți

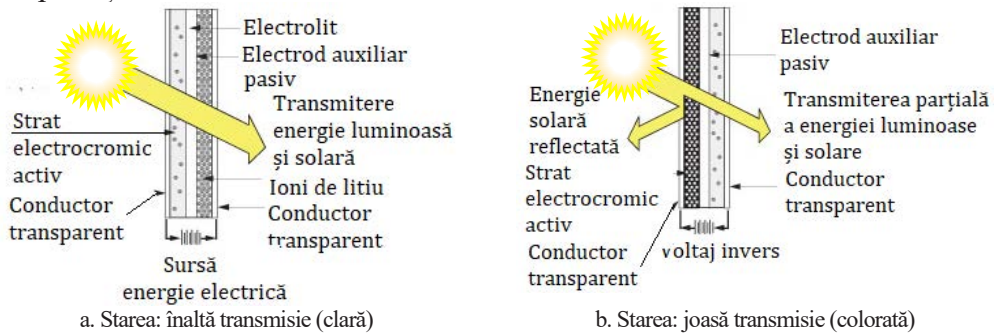


Fig. 11. Diagrama schematică a unei sticle electrocrome cu cinci straturi (conformement "Worldwide Energy Efficiency Technology Roadmap project")

Prin aplicarea unei tensiuni, ionii  $\text{Li}^+$  sunt transferați din stratul de acumulare la electrod și comută culoarea într-o stare întunecată (Iuliano, și colab., 2016). Acest lucru se realizează în stratul de acumulare (colorare anodică din cauza pierderii ionilor) sau în stratul de electrod (colorare catodică datorită câștigului ionilor) în funcție de materialele electrocromice utilizate. Prin aplicarea din nou a unei tensiuni, ionii se întorc de la electrod la stratul de acumulare și dispozitivul este din nou transparent (Sibilio, și colab., 2018). Figura 7 de mai jos reprezintă schema de funcționare a geamurilor electrocromice.

O particularitate a unei sticle electrocrome este că aceasta poate trece de la o stare clară, la una întunecată prin diferite stări intermediare. Astăzi, dispozitivele electrocromice sunt cele mai potrivite pentru construirea anvelopelor și a ferestrelor comutabile. Această tehnologie a apărut pe piață foarte recent, la începutul anilor 2000 și, de atunci, a fost în mod continuu îmbunătățită. În plus, sticla electrocromă: prezintă o foarte bună durabilitate; poate fi auto-alimentată de o baterie fotovoltaică situată la marginea ferestrei (Casini, 2018); în cele mai multe cazuri necesită putere de joasă tensiune (0-10 volți cc); rămân transparente în întreaga gamă de comutare; pot fi modulate la stări intermediare între clar și complet colorat<sup>1</sup>. Pentru a identifica și/sau îmbunătăți performanțele sticlelor electrocrome s-au realizat o mulțime de studii care au arătat că tehnologia electrocromică influențează semnificativ performanța energetică, confort termic și confortul vizual (Aldawoud, 2013; Cannavale, Ayra și Martellotta, 2018; Dussault & Gosselin, 2017; Frattolillo, Loddo, Mastino și Baccoli, 2019; Mäkitalo, 2013; Tällberg, la al., 2019).

În prezent se lucrează la unele dispozitive reflectorizante comutabile. Pentru a reduce transferul de căldură din stratul de geam electrocromic absorbant către interior se utilizează acoperirile cu emisii reduse (o proprietate inerentă a unor geamuri EC) și o configurație de unitate de sticlă izolatoare. Ferestrele EC tipice au un interval de transmisie vizibil superior la 0,50-0,70 și un interval inferior la 0,02-0,25. SHGC variază între 0,10-0,50. Pentru confidențialitate în timpul zilei, pentru controlul radiației solare directe și al orbirii și respectiv pentru reducerea nevoii de umbrire interioară este de dorit o transmisie redusă. Pentru a permite trecerea luminei zilei în timpul zilelor înnorate și pentru încălzirea solară pasivă în timpul iernii este necesară o transmisie ridicată. La o radiație transmisă mare, fereastra electrocromă poate să satisfacă o gamă largă de cerințe de mediu.

Pentru unele tipuri EC (*laminat polimeric*), dispozitivul este comutat la starea dorită și nu este necesară nicio putere pentru a menține această stare. Acest tip de dispozitiv are o memorie de lungă durată după comutație<sup>2</sup>. Un alt tip EC (*integral solid*) necesită o putere minimă de joasă tensiune pentru a schimba și menține o stare dată ( $0.0929 \text{ W/m}^2$ ). Când este oprită, EC "se stinge" încet. EC în stare solidă este mai durabilă decât cea polimerică și extrem de robustă în condiții de căldură și frig și sub soare intens (s-a demonstrat prin teste independente)<sup>3</sup>.

Viteza de comutare este legată de dimensiunea și temperatura ferestrei. Colorarea durează de obicei puțin mai mult decât decolorarea. Pe vreme rece, geamurile EC vor fi acționate pentru a controla strălucirea. Impactul expunerii directe la lumina soarelui asupra geamurilor va face ca timpul de comutare să fie mai rapid, deoarece absorbția soarelui va face ca învelișurile să se încălzească. Și, desigur, pe vreme rece fără soare direct, este mai puțin probabil ca ocupanții să dorească să nuanțeze sticla. În aplicațiile

<sup>1</sup> În stare colorată, radiația solară este absorbită (ca și în cazul sticlei colorate).

<sup>2</sup> alimentarea nu este necesară timp de trei până la cinci zile pentru a menține o stare de comutare dată

<sup>3</sup> dispozitive au fost cicluate (de la clar la colorat și apoi din nou) de mai multe ori în condiții realiste, astfel încât să ne putem aștepta la performanțe susținute pe termen lung pe durata de viață tipică a instalației de 20-30 de ani.

reale de construcție, o schimbare treptată a transmisiei este avantajoasă, deoarece permite ochilor ocupantului să se adapteze la schimbarea nivelurilor de lumină fără a provoca disconfort. Geamurile electrocromice sunt fabricate ca unități de sticlă izolată folosind geamuri standard sau laminate. Cablurile care se extind de la o margine sunt legate într-un sistem de control de joasă tensiune alimentat de instalația electrică a clădirii sau cu ajutorul celulelor fotovoltaice. Fereastra / luminatorul pot fi acționate de un întrerupător manual o telecomandă, un sistem automat simplu de sine stătător, un sistem centralizat de gestionare a energiei.

Controlul și modularea luminii primite și a aperturilor de căldură solară cresc confort ocupanților și reduc facturile de energie. Prețul inițial mai ridicat al geamurilor electrocromice poate fi compensat parțial de acești factori și aceste sisteme devin competitive din punct de vedere al costurilor sau pot avea un cost inițial mai mic decât soluția alternativă completă de sticlă „statică” plus echipamente HVAC suplimentare, plus umbrele / jaluzele interioare ale ferestrelor și sisteme de umbrire exterioare mobile. Ferestrele electrocromice oferă utilizatorilor: capacitatea de modulare a aperturilor de căldură prin fereastră; protecția la decolorare a obiectelor interioare; o funcționare economică a HVAC (capacități instalate mai mici, timp de funcționare redus, consum de energie redus). Prin economia realizată la instalațiile HVAC se pot compensa costurile geamurilor, ceva mai ridicate decât în tehnologia clasică. În plus, vitrarea electrocromă oferă funcționalitate pe care alte tipuri de umbrire nu o oferă: în stări mai întunecate se reduce nivelul de transmisibilitate vizuală și nu se blochează complet vederea.

Tehnologia electrocromică este cunoscută de peste treizeci de ani și a fost cercetată activ în întreaga lume. Rezultatele de laborator au fost promițătoare și au condus la dezvoltarea ferestrelor prototip și comercializarea ulterioară a produselor în aplicațiile rezidențiale și comerciale. Exemple de prototipuri de ferestre electrocromice au fost demonstrate în clădiri din Statele Unite, Japonia, Europa. Au fost efectuate teste pe teren, la scară naturală, de către *Berkeley California* și la sediul *DOE din Washington, DC* de către *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)*. Testele au demonstrat posibilitatea de reducere cu 20-30% a sarcinii de răcire, cu peste 60% a necesarului de energie pentru iluminat și cu 19-26% a sarcinii de vârf.

- **Ferestre gasocromice/GC/**

Aceste ferestrele fac parte din grupa ferestrelor dinamice și produc un efect similar cu ferestrelor electrocromice și specialiștii în domeniu le-au clasificat pe poziția a doua în această grupă. Tehnologia de realizare a lor este mai ieftină decât cea de obținere a sistemelor electrocromice/ECW, deoarece are nevoie de un singur strat subțire de  $WO_3$  acoperit de un catalizator de platină sau paladiu (Casini, 2018). Un sistem vitrat gazocromic poate fi aplicat pe orice substrat transparent (suportul poate diferi de sticlă). Principiul de funcționare este următorul: materialul chimocromic trece într-o stare întunecată prin expunerea unui strat gazos la un amestec de Ar și  $H_2$ . Dimpotrivă, prin introducerea  $O_2$ , starea clară este redusă la  $H_2O$  (Feng, și colab., 2016). Pentru a colora fereastra, se introduce în cavitatea unei unități de sticlă izolată hidrogenul diluat (sub limita de ardere de 3%). Dacă sistemul gazocromic este expus la oxigen fereastra revine

la starea sa originală (transparentă). Transport rapid al moleculelor de  $H_2$  se poate asigura prin prezența apei structurale în stratul de film de tungsten. Creșterea concentrației de  $H_2$  are ca efect întunecarea ferestrei (Sibilio, și colab., 2018). Pentru a menține o anumită stare, este necesară izolarea cavității de alte modificări ale conținutului de gaze. Componenta optic activă este o peliculă poroasă, sub formă de coloană, din oxid de tungsten, cu grosimea  $g < 1 \mu m$ . Se elimină astfel necesitatea electrozilor transparenți sau a unui strat conducător de ioni. Profunzimea și rata de colorare poate fi influențată de variațiile în grosimea filmului și de concentrația de hidrogen.

Transmitanța vizibilă a ferestrelor gazocromice poate varia în intervalul  $(0,10; 0,59)^4$  iar SHGC în intervalul  $(0,12; 0,46)$ . Se poate îmbunătăți valoarea  $U$  a geamurilor gazocrome se poate utiliza unui sistem triplu, cu law-E (în care un spațiu este utilizat pentru activarea gazocromului). Vitezele de comutare sunt  $v_c=20$  de secunde pentru colorare și  $v_c < 1$  min, pentru înălbire. Gazul se poate genera la peretele ferestrei. Se integrează în fațadă un electrolizator și un sistem de distribuție. Ferestrele gazocromice sunt supuse acum testelor de durabilitate accelerată și testelor pe teren la scară largă. Se așteaptă să ajungă pe piață în viitorul apropiat. În Figura 12 este reprezentată diagrama schematică a unui sistem gazocrom.

Sistemul vitrat gazocromic este mai ieftin (fabricație și asamblare simple). Timpul de comutare este mai rapid decât pentru ferestrele electrocromice. Datorită funcționării sale chimice, nu este necesară nicio putere pentru a menține o nuanță constantă (Casini, 2018).

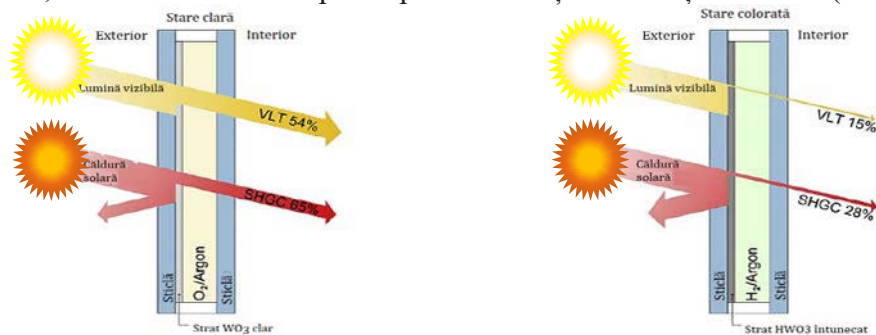


Figura 12 —Sistem vitrat gazocromic

Un studiu realizat de Feng arată că sarcinile HVAC pot scădea cu 28,4% comparativ cu o singură sticlă transparentă. Geamurile gazocromice consumă mai puțină energie în raport cu electrocromice (Feng, și colab., 2016).

- **Dispozitiv cu cristale lichide Windows**

Dispozitivele vitrate comutabile cu cristale lichide extrinseci au nevoie de o tensiune continuă pentru a menține starea clară. Există mai multe tipuri de cristale lichide dispersate cu polimeri, dar cele mai cunoscute și utilizate se bazează pe faza Smectică A2 (Gardiner, Morris și Coles, 2009). Geamurile dinamice cu cristale lichide sunt particule polarizate incluse în cavitatea unei sticle capabile să controleze transparența

<sup>4</sup> Pentru a asigura confidențialitate sau control orbirii se pot utiliza și geamuri gazocromice cu niveluri de transmitere mai mici de 0,01.

ferestrei (Seung-Won, Sang-Hyeok, Jong-Min și Tae-Hoon, 2018). Funcționarea acestora se bazează pe picături mici de cristal lichid, suspendate într-o matrice de polimer, situată între două substraturi de sticlă. Starea opacă și întunecată se obține în starea „oprit” a acestor particule care se află într-o poziție aleatorie în faza *nematică*. Prin aplicarea unei tensiuni pentru un dispozitiv LC extrinsec sau prin răcirea acestuia pentru un dispozitiv LC intrinsec, cristalele lichide tind să se alinieze și să reducă indicele de refracție dintre cristalele lichide și polimer. Aceasta este faza smectică<sup>5</sup> prezentată în Figura 13. Se ajunge astfel la starea clară și translucidă.

Sunt alcătuite dintr-un strat foarte subțire de cristale lichide intercalat între doi conductori electrici transparenți pe pelicule subțiri de plastic și întreaga emulsie sau ambalaj (denumită dispozitiv PDLC sau polimer dispersat cu cristale lichide) este laminată între două straturi de sticlă. Când alimentarea este oprită, cristalele lichide sunt într-o stare aleatorie și nealiniată. Răspândesc lumina și sticla apare ca un strat translucid, care ascunde vizualizarea directă și oferă intimitate. Materialul transmite cea mai mare parte a soarelui incident într-un mod difuz, astfel coeficientul său de câștig de căldură solară rămâne ridicat. Când se aplică energie, câmpul electric din dispozitiv aliniază cristalele lichide și geamul devine transparent într-o fracțiune de secundă, permițând vizualizarea în ambele direcții. Majoritatea acestor dispozitive au doar două stări, *clare* și *difuze*, iar puterea (aproximativ  $17/m^2$ , care funcționează între 24 și 100 volți curent alternativ) trebuie aplicată continuu pentru ca geamul să rămână în stare clară. Intervalul de transmisie vizibil este de obicei de 50-80%, iar SHGC este de 0,55-0,69, deși se pot adăuga coloranți pentru a întuneca dispozitivul în starea oprită. Unii producători oferă produse într-o varietate de culori și pentru sticlă curbată și plată. Formulările stabile cu ultraviolete (UV) permit acum aplicații exterioare, dar stabilitatea și costul UV sunt probleme nerezolvate.

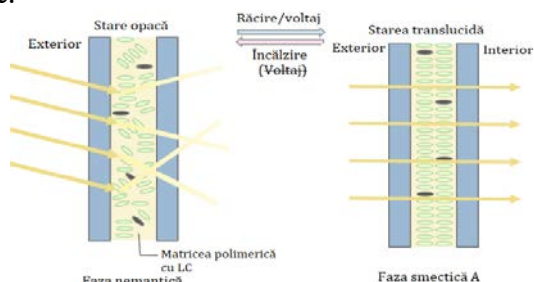


Figura 13. Mecanismul de operare al ferestrelor cu cristale lichide  
(După: Seung-Won, Sang-Hyeok, Jong-Min, & Tae-Hoon, 2018)

Procesul de producție este simplu<sup>6</sup> și necesită doar injectarea amestecului LC în cavitatea ferestrei.

<sup>5</sup> *Smectic* - o fază a unui dispozitiv cu cristale lichide are particularitatea că orientarea se face de-a lungul stratului normal, în timp ce pentru un alt smectic, acestea sunt orientate departe de acest strat. Fazele smectice diferă între ele prin tipurile și gradele de orientare și poziție. Faza Smectic A este preferată deoarece tendința de aliniere a cristalelor lichide este în corelație cu ordinea poziției. Combinația lor induce starea clară a dispozitivelor cu cristale lichide (Gardiner, Morris și Coles, 2009).

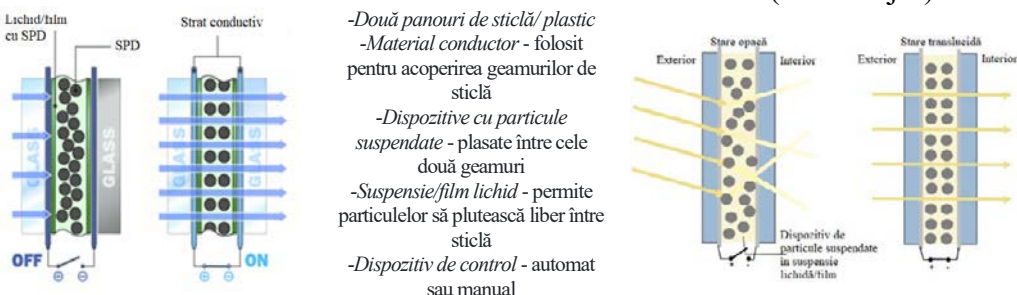
<sup>6</sup> Datorită auto-alinierii LC.



Dispozitivele cu cristale lichide pot fi îmbunătățite prin adăugarea altor componente în matricea polimerică<sup>7</sup>, Ele au fost experimentate de mai bine de 10 ani și și-au validat proprietățile (Seung-Won și colab., 2018). Totuși, tehnologia nu este recomandată în domeniul construcțiilor datorită faptului că sistemul de control necesită alimentarea cu energie electrică în mod continuu (Casini, 2018).

• **Dispozitiv cu particule suspendate (SPD)/supape de lumină pentru ferestre**

Aceste dispozitive funcționează similar cu dispozitivele cu cristale lichide, dar cu picături în suspensie lichidă (Favoino și colab., 2018). Pentru polarizarea particulele aflate în suspensie trebuie aplicată o tensiune, care determină alinierea acestora cu câmpul electric. Dispozitivul conține un film controlat electric compus dintr-un strat subțire<sup>8</sup> în care sunt suspendate numeroase particule microscopice. În starea nealimentată particulele sunt orientate aleatoriu și blochează parțial transmisia și vederea soarelui. Conductorii electrici transparenti permit aplicarea unui câmp electric pe pelicula de particule dispersate, alinierea particulelor și creșterea transmitanței. Intervalele tipice de transmisie vizibilă (VT) și coeficientul de câștig de căldură solară (SHGC) numai pentru film sunt VT = 0,22-0,005 sau 0,57-0,12 și SHGC = 0,56-0,41 sau respectiv 0,70-0,50, cu timpi de comutare aproape instantanee (mai puțin de o secundă). Gama de comutare SHGC este mai limitată decât ferestrele electrocromice (vezi mai jos).



a. Alcătuire SPD (După: KEVIN BONSOR, Research Frontiers )

b. Figura Funcționarea SPD (După: Oltean, 2006)

Figura 14-Dispozitive cu particule suspendate/SPD

Dispozitivul necesită aproximativ 100 V<sub>ca</sub> pentru a funcționa de la starea oprită (colorată) la starea pornită (aproape transparentă) și poate fi modulat la orice stare intermediară. Cerințele de alimentare sunt de 0,5 W / sf (0.0465W/m<sup>2</sup>) pentru comutare și 0,05 W / sf (0.00465 W/m<sup>2</sup>) pentru a menține o stare de transmisie constantă dacă nu oprită (cea mai colorată stare de albastru cobalt). SPD conținute într-un strat conductiv ajung în contact cu electricitatea care determină alinierea lor și permit luminii să treacă prin fereastră. Fără electricitate, particulele suspendate sunt poziționate și orientate aleatoriu (Oltean, 2006). Mecanismul este reprezentat în Figura 14.

Tensiunile de funcționare ar putea coborî la aproximativ 35 volți AC. De asemenea, sunt în curs de dezvoltare noi suspensii pentru a obține mai multe culori diferite (verde,

<sup>7</sup> De exemplu azobenzen propus de Seung-Won

<sup>8</sup> Asemănător unui lichid

roșu și violet) și pentru a afecta până la o schimbare de până la 50% a transmitanței solare. Durabilitatea pe termen lung și proprietățile solare-optice nu au fost verificate independent. Produsele intră acum pe piață, dar costurile rămân o problemă.

- **Ferestre fotocromice**

Ferestrele fotocromice (PCW) funcționează similar geamurilor termocromice cu observația că mărimea în raport cu care se modulează transmisia luminii și căldurii solare este radiația solară (Tällberg și colab., 2019). Fotocromatica poate fi utilă împreună în prezența luminii zilei, permițând doar suficientă lumină să treacă în scopuri de iluminare, în timp ce se evită excesul de lumină solară care creează orbire și suprasolicită sistemul de răcire. În general, stratul fotocromic este realizat din cristalite de argint încorporate într-o matrice AIPO4 sau borosilicat. Culoarea sticlei nuanțate depinde de mărimea cristalitelor de argint. Ochelarii fotocromici există de mai bine de 50 de ani, dar au fost puțin cercetați pentru o utilizare în sectorul construcțiilor. Trebuie precizat că totuși, pentru piața de construcții nu sunt disponibile vitrajele mari și durabile (Fries, Fink-Straube, Menning și Schmidt, 2011).

În Figura 15 se ilustrează funcționarea sticlei fotocromice și se bazează pe studiul lui Fries. Ferestrele fotocromice, precum și ferestrele termocromice nu sunt utilizate obișnuit în sectorul construcțiilor din cauza aspectului lor incontrollabil și al faptului că nu sunt disponibile la discreție pe piață (Tällberg și colab., 2019).

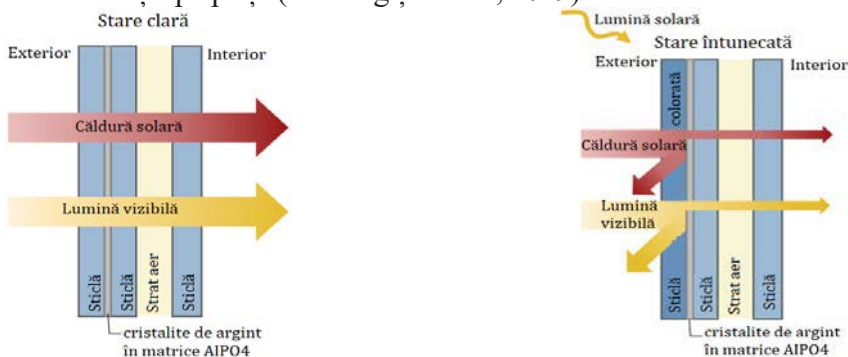


Figura 15. Modul de operare a sticlei fotocromice  
(După Fries, Fink-Straube, Menning, & Schmidt, 2011)

- **Nanocristal electrocromatic în sticlă (NC)**

Este o tehnologie electrocromatică emergentă promițătoare care vine să îmbunătățească performanța generală a geamurilor electrocromice. Dispozitivul NC este compus din nanocristal de oxid de indiu încorporat într-o matrice de sticlă realizată din oxid de niobiu (Sibilio, și colab., 2018). Se deosebește de geamurile electrocromice prezentate mai sus prin faptul că nanocristalul din sticlă funcționează atât prin absorbția ionilor  $Li^+$ , cât și prin pierderea electronilor dintr-un strat donator. O primă tensiune de reducere mărește purtătorii de ioni din nanocristalele cu oxid subțire și dă starea Rece reprezentată în Figura 16. Căldura solară este blocată, dar lumina este încă transmisă prin sticlă. Apoi, reducerea oxidului de niobiu al matricei de sticlă este generată prin scăderea tensiunii și se ajunge la starea întunecată. Această stare blochează aporturile de căldură

solară, precum și transmisia luminii (Casini, 2018).

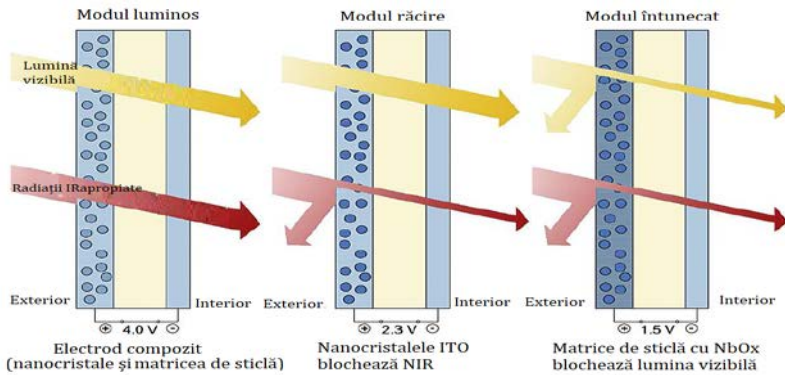


Figura 16. Compozit de nanocristale în matrice de sticlă (După Casini, 2018)

### • Fereastră cu pixeli electrocinetici

Au capacitatea de a modula nuanța și temperatura care provin din lumina vizibilă. În Figura 17 se prezintă compoziția unei astfel de ferestre.

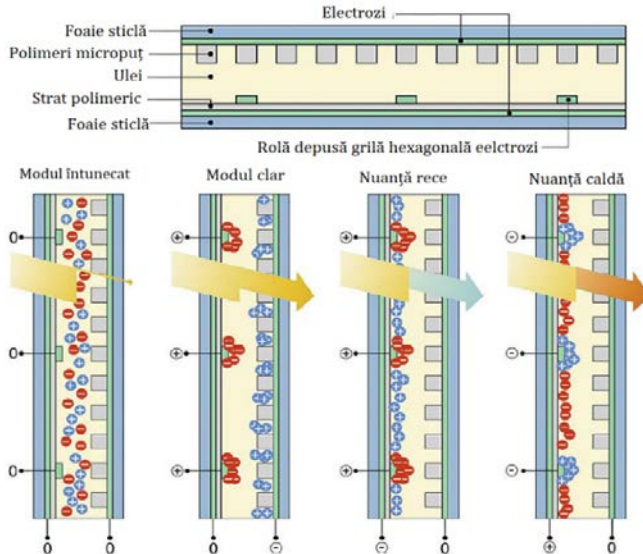


Figura 17. Compoziția ferestrei cu pixeli electrocinetici (După Casini, 2018)

Pentru a controla dispersia electroforetică a culorilor complementare (de exemplu albastru / galben) sunt folosiți doi electrozi planari. Aceștia se caracterizează prin încărcări electrice opuse. În funcție de semnul negativ sau pozitiv al încărcării furnizate, particulele de culoare se deplasează către electrodul inferior, superior sau perimetral. Un al treilea electrod, plasat în cavitatea interstrat, creează o plasă. Electrodul inferior poate replica polimerul "micro-gropi" devenind capabil să prindă particulele de culoare și să le inhibe răspândirea. În starea întunecată, când electrozii nu sunt încărcăți particulele de culoare sunt dispersate uniform. În starea clară, particulele de culoare sunt condensate spre perimetrul și electrozii inferiori. Tehnologia poate controla culoarea (mai cald dacă particulele galbene sunt dispersate și particulele albastre compactate în jurul electrodului perimetral sau mai rece dacă apare operația opusă) (Sibilio, și colab., 2018).