

# SODOBNE ZASTEKLITVE: VISOKO IZOLATIVNA IN INTELIGENTNA ("SMART") OKNA

Boris Orel, Kemijski inštitut, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana

## Novel highly insulating and switchable ("smart") windows for buildings

### ABSTRACT

Thermal and optical properties of various windows filled with different inert gases and equipped with various heat and protective coatings on glass are described and discussed in term of the window efficiency in various climatic conditions.

Utilization of the novel electrochromic and gasochromic windows with variable optical transmission in visible and near-IR spectral range of solar radiation spectrum are described and their impact on the energy saving of building is briefly discussed.

### IZVLEČEK

V članku opisujemo toplotno prevodnostne in optične lastnosti oken. Novost so elektrokromna in gasokromna okna, ki imajo zaradi spremenljivih optičnih lastnosti, večjo učinkovitost v različnih klimatskih razmerah.

### 1 UVOD

Na evropskem trgu prevladujejo okna z dvojno zasteklitvijo in argonskim (Ar) ali kriptonskim (Kr) polnjenjem. Razlog za takšno stanje je v državni regulativi in veljavnih standardih, po katerih se vsaj v Nemčiji zahteva, da je toplotna prevodnost  $U$  okna pod  $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  in da se mora pri celotnem enegijskem ravnotežju stavbe upoštevati tudi prepuščeno sončno sevanje. Obstaja vrsta načinov, s katerimi lahko ugotovimo optične in termične lastnosti oken, ter delež, ki ga predstavlja sončno sevanje v energijski bilanci stavbe. Ne glede na vrsto izračuna in na pot, ki jo uberemo, pa je energijska učinkovitost oken odvisna še od klimatskih razmer ter je različna za različno usmerjena pročelja (sever, jug).

V tem prispevku želimo prikazati medsebojni vpliv toplotne prevodnosti okna ter njegovih optičnih lastnosti - predvsem prepustnosti za sončno sevanje v spektralnem območju od  $0,3$  do  $2,5 \mu\text{m}$  - na energetsko ravnotežje stavbe ter predstaviti nove rešitve, ki jih nakazujejo inteligentna ("smart") okna. Le-ta imajo sposobnost prilagajanja svojih optičnih lastnosti in to tako, kot jih narekujejo spremenljivost dotoka sončnega sevanja ter energijske potrebe stavbe. Tako bomo po vrsti predstavljali nekatere nove rešitve oken-skih zasteklitvev z nizko emisijskimi prevlekami, nove prevleke za zmanjšanje odbojnosti stekel ter na primeru inteligentnih oken s spremenljivimi optičnimi lastnostmi predstavili dosežke Laboratorija za spektroskopijo materialov.

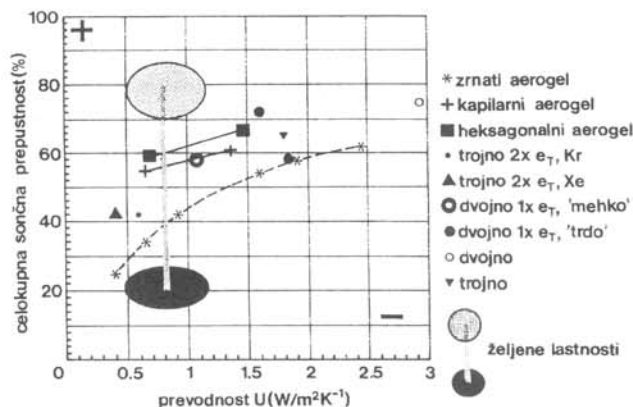
### 2 REZULTATI IN RAZPRAVLJANJA

Okno mora zadoščati štirim med seboj nasprotnim si zahtevam:

- (i) imeti mora majhne toplotne izgube (majhno vrednost  $U$  ali velik toplotni upor)
- (ii) omogočati mora v največji meri dotok sončnega sevanja v prostor (visoko prepustnost)

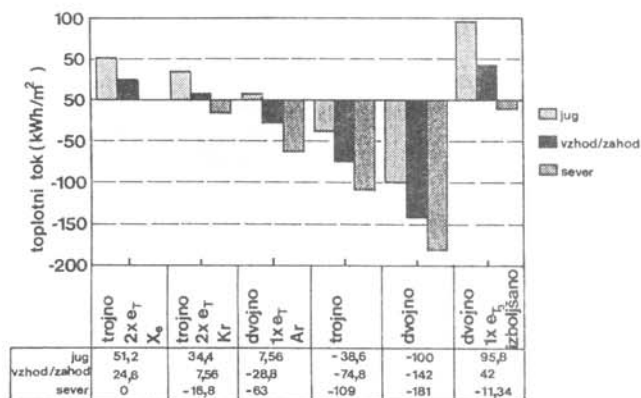
- (iii) zagotoviti mora pravilno osvetlitev in
- (iv) preprečiti mora pregrevanje prostora.

Zadostiti le prvi od zahtev je relativno enostavno z uporabo polnjenja dvojnih ali trojno zasteklenih oken z inertnimi plini (Ar, Kr, Xe) in z uporabo stekel s prevlekami z nizko termično emisivnostjo ( $e_T$  - "low e-glass"). Čeprav imajo takšna trojno zasteklena okna toplotno prevodnost že od  $0,4$  do  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , so njihove optične lastnosti slabe, saj znaša prepustnost sončnega sevanja samo  $42\%$ . To je bistveno manj, kot je prepustnost trojno zasteklenih oken s šipami brez nizkoemisijskih prevlek, ki prepuščajo kar  $65\%$  sončnega sevanja.



Slika 1. Odvisnost celokupne sončne prepustnosti (v %) od toplotne prevodnosti za različne vrste oken

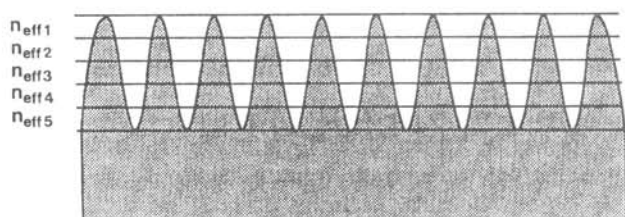
Podatki, prikazani na sliki 1, nazorno kažejo na kompromisnost rešitev. Te so v istočasnem zmanjšanju toplotne prevodnosti dvojno in trojno zasteklenih oken, opremljenih z nizkoemisijskimi prevlekami, kar gre na račun njihove bistveno manjše prepustnosti za sončno sevanje. Med najboljša okna sodijo tista, kjer je polnilni plin Xe nadomestil sicer bolj uporabljeni Ar in pri katerih so na steklih tanke prevleke plemenitih kovin z nizko emisivnostjo. Okna z vstavljeno polikarbonatno ali poliakrilatno transparentno izolacijo (TIM - Transparent Insulation Materials) različnih oblik (zrnato, kapilarno ali heksagonalno) se sicer odlikujejo po visoki prepustnosti za sončno sevanje ob istočasni nizki toplotni prevodnosti, vendar je njihova glavna pomankljivost v tem, da je skozi njih pogled oviran, saj prepuščajo le sipano svetlobo. Kljub temu je njihova prihodnost obetavna. Tako je nesporna njihova uporaba v pasivnih sončnih sistemih nizkoenergetskih stavb, pri katerih se stremi za čim večjim toplotnim učinkom na račun dogrevanja s sončnim sevanjem in neposredni pogled skozi okno ni posebno pomemben.



Slika 2. Odvisnost toplotnega toka v (+) in skozi okno nazaj (-) (v kWh/m<sup>2</sup>) od vrste oken ter usmerjenosti pročelja stavbe

Na povezanost vpliva, ki ga imata prepustnost okna in njegova toplotna prevodnost na letno energijsko ravnotežje stavbe najboljše ponarjajo rezultati na sliki 2. Računi, ki so bili narejeni za klimatske razmere v Nemčiji, in ni nujno, da veljajo tudi za Slovenijo, kažejo, da "najboljše" okno (3-krat zasteklitev, 2-krat nizkoemisijnska prevleka in Xe polnjenje) že kaže pozitivno energijsko ravnotežje (-50 kWh/m<sup>2</sup>). Takšno okno, vstavljeno na severno fasado, nima izgub. Dodatno izboljšanje bi dosegli le, če bi povečali njegovo prepustnost. Ta je prenizka in za takšno okno ni večja od 40 %.

Razloga za majhno prepustnost trojno zasteklenih oken sta dva: visoka odbojnost okenskih stekel, ki je za vsako stekleno površino približno 4%, in znatna absorpcija, ki jo imajo nizkoemisijnske prevleke za vidno sevanje sončnega spektra. Medtem ko je razvoj nizkoemisijnskih prevlek že dosegel nivo, ki ne kaže, da bi lahko dosegli še večjo sončno prepustnost (>0.9), pri sicer zelo nizki termični emisivnosti (<0,7), pa je razvoj navadnih stekel z nizko odbojnostjo tista možnost, ki do sedaj v polni meri še ni bila izkoriščena. Odbojnost stekla lahko zmanjšamo z nanosom protiodbojnih - λ/4-skih prevlek, ki povečajo njihovo prepustnost. Takšne λ/4 prevleke so le delna rešitev, saj z njimi v principu ne moremo zmanjšati odbojnosti za vse območje sončnega sevanja (0,3-2,5 μm). Z λ/4 plastmi lahko zmanjšamo odbojnost le za vidno (fotopično) sevanje sonca, ne pa za celotni sončni spekter, kar ima



Slika 3. Shematični prikaz prevleke (graded refractive index layer), ki daje širokopasovno nizko odbojnost steklu

za posledico, da takšna okna niso v zadostni meri energetske učinkovita.

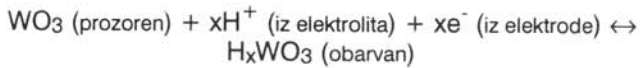
Dodaten problem, ki se praviloma pojavlja pri steklih z λ/4 prevlekami, je njihova različna obarvanost, ki jo opazimo, če opazujemo okno pod različnimi koti. Boljšo rešitev predstavljajo prevleke s spremenljivim lomnim količnikom (graded refractive index layer) (slika 3). Dve tehnologiji obetata, da bosta omogočili industrijsko pripravo takšnih prevlek: sol-gel tehnologija in kontrolirano jedkanje stekel. Pri obeh uporabljenih tehnologijah dosežemo, da postane površina stekla primerno hrapava in s tem podobna očesu nekaterih nočnih metuljev. Takšne hrapave strukture lahko pripravimo po sol-gel tehnologiji tako, da na steklo ali polimerno folijo naneseemo ustrezno tanko plast fotorezista, ki ga holografsko osvetlimo. S kemično odstranitvijo neutrjene sol-gel prevleke dosežemo primerno hrapavost površine, katere odbojnost je le 1 %, in to za vse valovne dolžine sončnega sevanja (0,3-2,5 μm).

Okna z nizko toplotno prevodnostjo in visoko prepustnostjo sončnega sevanja (zahtevi (i) in (ii)) so primerna za stavbe v klimatsko hladnih področjih, kjer je predvsem potrebno preprečiti toplotne izgube, in do prekomernega osonečenja prostorov ne prihaja. Težave nastopijo v primeru, ko je sonce nad obzorjem (evropski sever) in je osvetlitev prostorov prevelika (zahteva (iii)). Drug problem je pregrevanje, ki je značilnost vročih klimatskih področij (zahteva (iv)) in ki ga lahko odpravimo le z uporabo ustreznih klimatskih naprav. Dejstvo je, da kakršna koli kombinacija prevlek, stekel, polimerov in drugih materialov, ki se uporabljajo za okna, ne vodi do smiselnih rešitev, ki bi zadostila kontravernim zahtevam (i) - (iv). Rešitev je le v uporabi inteligentnih ("smart") oken, katerih optične lastnosti, tj. prepustnost in/ali odbojnost, lahko spreminjamo po svoji želji in v skladu s toplotnim režimom stavbe in zunanji razmerami.

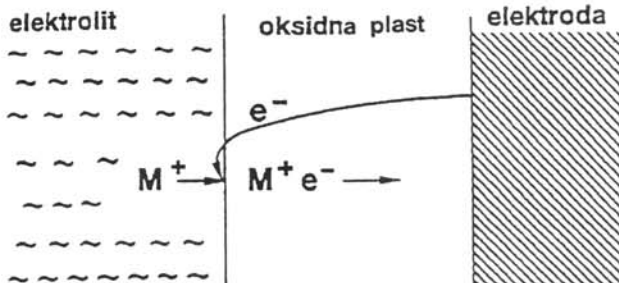
Do sedaj so znani štirje načini, ki omogočajo spremenljivost optičnih lastnosti šip. Ti so: fotokromizem, termokromizem, elektrokromizem in termotropizem. Tekoči kristali zaradi svoje podvrženosti fotodegradaciji niso primerni za stavbna okna.

Medtem ko se fotokromna okna odzivajo na množino sevanja (dozo), ki spremeni njihovo prepustnost in termokromna okna spreminijo optične lastnosti pri določeni temperaturi, se optične lastnosti elektrokromnih oken spreminjajo v odvisnosti od električne napetosti in so tako v celoti pod kontrolo porabnika. To je odločilna prednost, ki je utrdila smotrnost uporabe elektrokromnih oken pred drugimi sistemi. Termotropna okna ne morejo tekmovati z elektrokromnimi, saj v stanju z nizko prepustnostjo sipljejo svetlobo in se skozi ne vidi, medtem ko je pogled skozi elektrokromna okna, ne glede na stanje njihove prepustnosti in na kot pod katerim gledamo skozi, vseskozi nemošen.

Razvoj elektrokromnih oken se je začel v poznih 70-tih letih, ko so odkrili, da se tanke prevleke WO<sub>3</sub> pri negativnih potencialih, pri tem ko so v stiku s tekočim elektrolitom, ki vsebuje H<sup>+</sup> ione, temno modro obarvajo. Pri tem pride do vključevanja (interkalacije) H<sup>+</sup> ionov v strukturo prevleke in tvori se volframova bronza. Proces opišemo z naslednjo topokemično reakcijo:

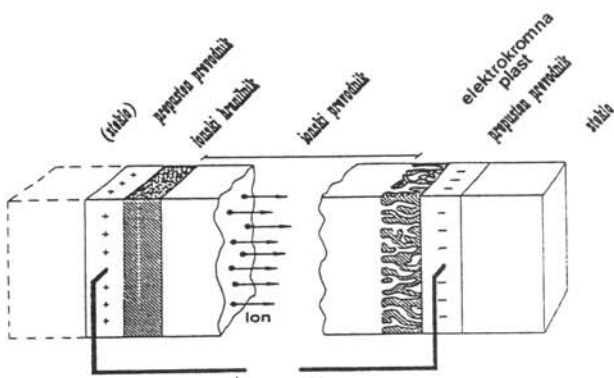


Proces je reverzibilen in pri obrnitvi napetosti vodi do izločitve (deinterkalacije)  $\text{H}^+$  ionov nazaj v elektrolit in ponovnega razbarvanja tanke prevleke (slika 4).



Slika 4. Model prehoda ionov ( $\text{H}^+ = \text{M}$ ) in elektronov  $\text{e}^-$  v prevleko  $\text{WO}_3$ , naneseno na elektronsko prevodno ter za sončno svetlobo prepustno prevleko (navadno "trda" prevleka)

Elektrokemično celico, ki deluje kot elektrokromni pokaznik, dobimo (slika 5), če  $\text{WO}_3$  spravimo preko ionskega prevodnika v kontakt s protielektrodo, ki nam rabi kot ionski rezervoar, v katerega se ioni umaknejo, pri tem ko se  $\text{WO}_3$  razbarva. Prototipi inteligentnih elektrokromnih oken so že znani vsaj desetletje in dosegajo velikost do  $1 \text{ m}^2$ , vendar komercialno dosegljivih elektrokromnih oken na trgu še ni. Osnovne optične karakteristike so prepustnost okna v razbarvanem stanju (ta je od 55 do 65 %), prepustnost v obarvanem stanju (vsaj za sedaj še ne manj kot 20 %) ter odzivni čas (nekaj minut). Odzivni čas je relativno dolg, kljub dejstvu, da imajo nekateri elektrokromni materiali (recimo Ir-oksidi) odzivni čas le nekaj ms. Razlog je v možnem onesnaženju (light pollution) urbanih naselij, do katere bi prišlo, če bi vsako od oken v zgradbi



Slika 5. Elektrochromni pokaznik:  
 - elektrokromna prevleka ( $\text{WO}_3$ )  
 - ionski prevodnik ( $\text{H}^+$  ali  $\text{Li}^+$ )  
 - ionski hranilnik ( $\text{Sb:Mo:SnO}_2$ )  
 - "trda" prevleka z elektronsko prevodnostjo (elektroda)  
 - steklo

neodvisno od drugega hitro spreminjala svojo barvo in odbojnost.

Tako nam je v Laboratoriju za spektroskopijo materialov na Kemijskem inštitutu uspelo pripraviti elektrokromno okno z naslednjo konfiguracijo prevlek:

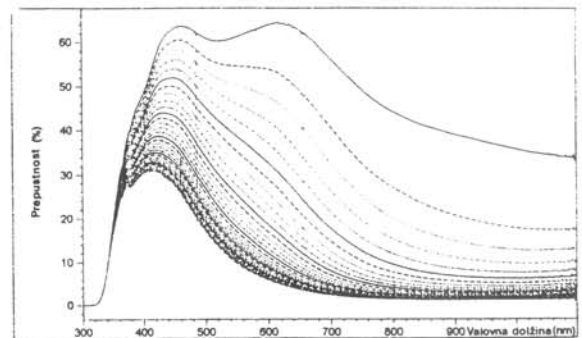


Elektrokromno okno smo sestavili z lepljenjem dveh kosov stekla (laminated electrochromic device), na katera sta naneseni prevleki  $\text{WO}_3$  in  $\text{Sb:Mo:SnO}_2$ , od katerih slednja rabi kot ionski hranilnik. Kot prikazuje slika 6 se doseže obarvanje, ki ima značilen spekter volframove bronzne, v 120 sekundah. Barva okna je

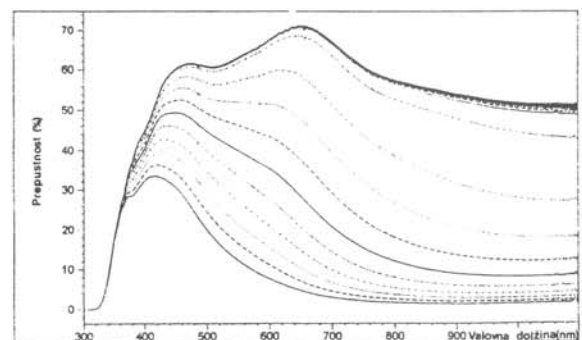
Okno:  $\text{Mo}(10\%):\text{Sb}(7\%):\text{SnO}_2(3x)/\text{ormolyte}/\text{WO}_3$

Po 500 ciklih

a) Obarvanje, 120 s pri -4 V



b) Razbarvanje, 120 s pri +2.5 V



Slika 6. Obarvanje (a) in razbarvanje (b) elektrokromnega pokaznika, sestavljenega iz  $\text{WO}_3$  (250 nm)/ionskega prevodnika (100  $\mu\text{m}$ )/ $\text{Sb:Mo:SnO}_2$  (150 nm), izmerjenega po 500 krožnih potencialnih spremembah. Spektri so snemani vsake 3 sekunde. Obarvanje dosežemo pri vrinenju  $10 \text{ mC/cm}^2$  naboja v času 120 s pri napetosti -4V. Razbarvanje dosežemo pri izločitvi tega naboja pri napetosti +4V. Časovna skala je za oba procesa enaka. Opazno je bistveno hitrejšo razbarvanje kot obarvanje.

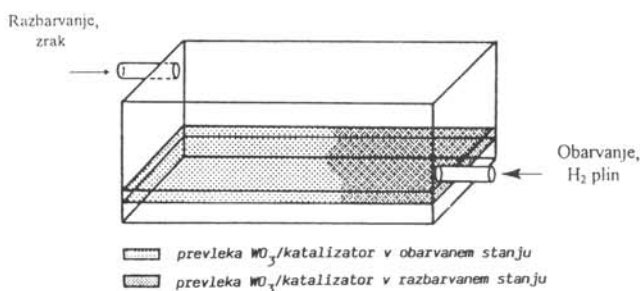
temno modra s fotopično prepustnostjo okrog 20% v modrem delu vidnega spektra, medtem ko je njegova prepustnost pri daljših valovnih dolžinah vsega nekaj %. V razbarvanem stanju je prepustnost približno 65 % in je odvisna od debeline  $WO_3$ . Prepustnost protielektrode (Sb, Mo:SnO<sub>2</sub>) ne vpliva na prepustnost okna v razbarvanem stanju. Pravimo, da je protielektroda elektrokromno pasivna. Tovrstna okna so posebej obetavna, ker ohranjajo osnovno barvo elektrokromno aktivne prevleke  $WO_3$ . Tako ni bojzani, da bi prišlo do subtraktivnega obarvanja okna in s tem do estetsko neprimerne obarvanja in razbarvanja.

Nadaljnji razvoj elektrokromnih oken gre v smeri priprave sistemov, ki bodo omogočali spreminjanje prepustnosti vsaj od 60 % do 10 % ali manj. Sedanja generacija elektrokromnih oken, ki omogoča spreminjanje le od 60 % do 20 ali 30 %, je omejena z uporabo ionskih hranilnikov, katerih kapaciteta je premajhna, da bi lahko izkoristili globoko obarvanje  $WO_3$ -ja.

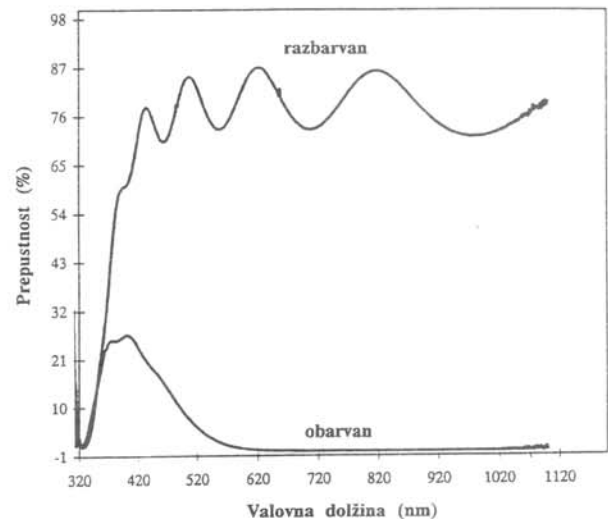
Zato raziskave potekajo v smeri iskanja drugih rešitev, ki bi bile enostavnejše in pri katerih bi se izognili uporabi protielektrod in ionskih prevodnikov. Tak primer raziskav so gasokromna okna (slika 7). Pri gasokromnih oknih smo dosegli obarvanje z vodikom, ki v stiku s prevleko  $WO_3$ , primerno aktivirano s katalizatorjem, tvori podobno, kot je prikazano v enačbi 1, volframovo bronzo (slika 8). Gasokromni sistem je bistveno enostavnejši od elektrokromnega in ima zaradi manjšega števila šip bistveno večjo prepustnost v razbarvanem stanju. Težavo pomeni vodik in z njim povezana eksplozivnost ter predvsem pomanjkanje raziskav gasokromizma v zadnjih desetletjih.

Ključnega pomena, tako za delovanje elektrokromnih oken, kot za izdelavo oken z majhno toplotno prevodnostjo, so nizkoemisijske prevleke. Te so v principu tudi električno prevodne in nam rabijo kot elektroda, na katero se nanašajo aktivni elektrokromni materiali in ionski hranilniki.

Razvoj nizkoemisijskih prevlek poteka v smeri "mehkih" in "trdih" prevlek. Med "mehke" sodijo predvsem zelo tanke prevleke plemenitih kovin (Ag, Au na steklu), večkrat prekrivane s tanko zaščitno  $\lambda/4$  prevleko  $SiO_2$  ali  $Bi_2O_3$ . Njihova termična emisivnost je zelo majhna in je od 0,04 do 0,1, kar je bistveno bolje kot so ustrezne vrednosti "trdih" prevlek, ki so od 0,1 do 0,2. Med slednjimi prednjačijo na različne načine dopirani kositrov oksid (SnO<sub>2</sub>), novi materiali na osnovi Zr-oksida in predvsem nekateri nitridi prehodnih kovin obetajo bistveno izboljšanje mehanskih in optičnih lastnosti "trdih" prevlek.



Slika 7. Shematska predstavitev delovanja gasokromnega okna



Slika 8. Obarvanje in razbarvanje gasokromne  $WO_3$  prevleke z dodatkom katalizatorja (debelina 200 nm)

### 3 SKLEPI

- Dosežki na področju novih materialov in ustreznih tankih prevlek omogočajo pripravo inteligentnih oken z velikim dinamičnim obsegom spreminjanja optičnih lastnosti, tako prepustnosti kot odbojnosti.
- Protiodbojne prevleke postajajo tehnološko vse bolj dostopne in bodo prispevale k povečanju prepustnosti oken z dvojno in trojno zasteklitvijo.
- Nove "trde" prevleke bodo omogočile izdelavo oken z nizko toplotno prevodnostjo in bodo tako bistveno prispevale k še večji uporabi takšnih oken v pasivnih in nizkoenergijskih sončnih stavbah.

### ZAHVALA

Raziskavo je podprlo Ministrstvo za znanost in tehnologijo, in sicer v okviru projekta J1-5012, za kar se mu na tem mestu zahvalujemo.

### 4 LITERATURA

Samostojni projekti ali sodelovanje v:

- /1/ High Performance Variable Solar Control Glazing (SMART GLASS) - Pilkington (U.K.). JOE3-CT95-30 (DG12-WSME).
- /2/ Properties of Glazing Materials with Respect to Daylighting Applications. JOE2-CT92-0052, PECO Programme, ENTPE (Fr).
- /3/ Spektroskopske in spektroeletrokemijske raziskave elektrokromnih elementov, J1-5012-104.
- /4/ Spektralno selektivne energetske učinkovite prevleke. L2-7632-104.
- /5/ A. Krainer, Toward Smart Buildings (1994), TEMPUS Joint European Project JEP 1802, Building Science and Environment Conscious Design, Module 1: Design Principles, ISBN 0 9525703 7 8, London.
- /6/ Pametna hiša - termični in optični del, P2-5226-0792, 1993-1995.