

MATERIÁLY PRO TENKÉ VRSTVY INFRAČERVENÝCH ZRCADEL

JITKA MOHELNÍKOVÁ

Fakulta stavební VUT v Brně, Veverí 95, 602 00 Brno
mohelnikova.j@fce.vutbr.cz

Došlo 22.7.05, přijato 22.11.05.

Klíčová slova: infračervená zrcadla, optické vlastnosti skel, tenké vrstvy pro IČ zrcadla

Obsah

1. Úvod
2. Měření optických vlastností skel
3. Princip funkce infračervených zrcadel
4. Skladba tenkých vrstev pro infračervená zrcadla
5. Závěr

1. Úvod

Motivace k využívání solární energie v budovách a energeticky úsporné programy způsobily vývoj a rozšíření speciálních druhů okenních zasklení^{1–3}, která mají, v porovnání s obyčejnými skly, upravené optické vlastnosti na požadované parametry dle účelu jejich používání. Některé typy speciálních skel pracují na principu infračervených zrcadel². Na povrchu těchto zasklení jsou při výrobě nanášeny tenké vrstvy, které odrážejí dlouhovlnné infračervené záření interiéru zpět do místnosti. Uvedená skla tedy omezují tepelné ztráty radiací. Označují se také jako skla s nízkou emisivitou nebo tepelná či infračervená zrcadla.

Vzhledem k tomu, že výrobci neuvádějí podrobné informace o těchto speciálních sklech, cílem publikované práce bylo najít vhodné materiály, které mohou být použity pro tenké vrstvy infračervených zrcadel.

2. Měření optických vlastností skel

Optické vlastnosti uvedených skel jsou v odborné literatuře i podle údajů výrobců většinou udávány v podobě průměrných hodnot odrazivosti a propustnosti, popř. pohltivosti. Nejsou však zveřejňovány spektrální charakteristiky ani materiálové složení speciálních tenkých vrstev, které zajišťují vysokou odrazivost infračerveného záření. Z toho důvodu bylo provedeno spektrální měření vybraných vzorků skel za účelem zjištění optických vlastností a na základě jejich analýzy byl proveden výběr vhod-

ných materiálů pro uvedené vrstvy. Podle změřených spektrálních charakteristik činitelů prostupu $\tau(\lambda)$ a odrazu $\rho(\lambda)$ byl hledán optimální návrh složení tenkých vrstev vysoce odrazných v oblasti dlouhovlnného infračerveného záření.

Byly posuzovány následující dva vzorky skel:

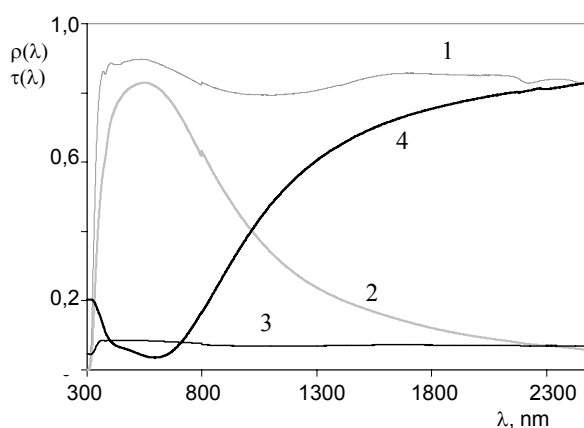
- vzorek A: čiré sklo float, tl. 4 mm
- vzorek B: nízkoemisivní sklo Planitherm, tl. 4 mm

Tyto vzorky o velikosti 30 mm × 30 mm byly posouzeny na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně na Katedře fyziky pevné fáze. Bylo provedeno spektrální měření v oblasti od ultrafialového do infračerveného záření, v rozsahu vlnových délek $\lambda \in (300 \text{ nm}, 2500 \text{ nm})$, tedy v intervalu vlnových délek odpovídajících spektrálnímu složení slunečního záření dopadajícího na zemský povrch. Dále byly ověřovány vlastnosti těchto skel v oblasti dlouhovlnného infračerveného záření v intervalu $\lambda \in (5 \text{ } \mu\text{m}, 11 \text{ } \mu\text{m})$. Ke spektrálnímu měření bylo použito těchto spektrometrů:

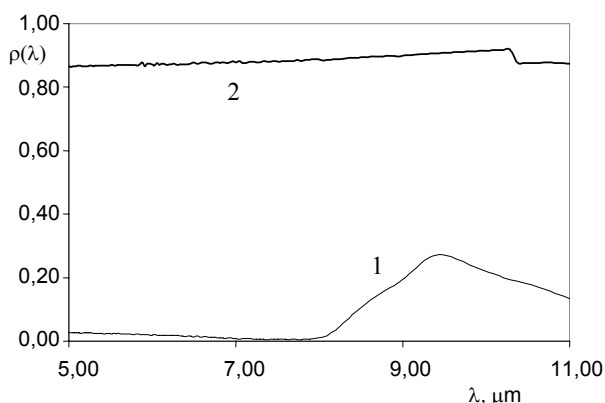
- VARIAN CARY 5E (vlnový rozsah 185–3300 nm),
- ZEISS SPECORD M80 (vlnový rozsah 2,5–50 μm).

Na obr. 1 je ukázka zpracovaných výsledků z uvedených měření.

Vzhledem k tomu, že sklo Float má v porovnání se vzorkem B ve středu viditelné oblasti vyšší propustnost $\tau(555 \text{ nm}) = 0,91$, ale také vyšší odrazivost $\rho(\lambda=555) = 0,09$, zatímco vzorek B nižší propustnost $\tau(555 \text{ nm}) = 0,83$ a nižší odrazivost $\rho(555 \text{ nm}) = 0,07$, lze usuzovat, že u vzorku B dochází k větší absorpci světla, tedy $\alpha(555 \text{ nm}) = 0,1$. Absorpce je způsobena existencí speciálních tenkých vrstev nanášených na povrchu skla. Tato vrstva pohlcuje část viditelného záření. Důkaz existence této vrstvy podává i zvýšená odrazivost posuzovaného vzorku skla na rozhraní mezi viditelnou a infračervenou oblastí (vlnová délka 780 nm) (viz obr. 1).



Obr. 1. Spektrální propustnost a odrazivost vybraných vzorků skel; 1 – spektrální propustnost $\tau(\lambda)$ – vzorek A, 2 – spektrální propustnost $\tau(\lambda)$ – vzorek B, 3 – spektrální odrazivost $\rho(\lambda)$ – vzorek A, 4 – spektrální odrazivost $\rho(\lambda)$ – vzorek B



Obr. 2. Odraživost vzorků skel v oblasti infračerveného záření (od 5 do 11 μm); 1 – spektrální odrazivost $\rho(\lambda)$ – vzorek A, 2 – spektrální odrazivost $\rho(\lambda)$ – vzorek B

Je pozoruhodné, že z vysoce transparentního materiálu ve viditelné oblasti se sklo stává nepropustným pro oblast infračervenou, jak ukazují spektrální měření. Na základě měření bylo zjištěno, že sklo Float má v části infračerveného spektra v intervalu $\lambda \in \langle 5 \text{ m}, 11 \mu\text{m} \rangle$ velmi nízkou odrazivost. Pouze v okolí vlnové délky 10 μm se činitel odrazu zvyšuje na hodnotu $\rho(9,5 \mu\text{m}) = 0,28$ (viz obr. 2).

3. Princip funkce infračervených zrcadel

Sluneční záření procházející sklem dopadá na povrchy konstrukcí a předmětů v místnosti. Na těchto površích se zčásti odráží a zčásti prochází a pohlcuje. Při pohlcení se energie záření mění na kvalitativně jinou formu energie, např. na energii tepelnou, elektrickou nebo chemickou. U stavebních konstrukcí dochází většinou k přeměně na tepelnou energii. Konstrukce se ohřívají a jejich povrchy sálají dlouhovlnné infračervené záření, které sklo nemá schopnost propouštět mimo prostor místnosti.

Podle principu zachování energie musí při nízké odrazivosti a nulové propustnosti v infračervené oblasti docházet k vysoké absorpci záření, tedy $\alpha(\lambda) \rightarrow 1$, $\lambda \in \langle 5 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m} \rangle$. V chladných dnech, kdy venkovní teplota je nižší než teplota v interiéru, dochází k velkým ztrátám právě vlivem absorpce dlouhovlnného infračerveného záření z interiéru do skla okenní tabule a následné sálání tohoto záření do venkovního prostoru. Tepelným ztrátám radiací je však možno zabránit tím, že se na sklo nanese tenká, dostatečně transparentní vrstva, která zabrání absorpci infračerveného záření. Tato vrstva musí vykazovat vysokou odrazivost pro dlouhovlnné infračervené záření a nízkou emisivitu.

Prvořadá podmínka pro omezení tepelných ztrát zasklení radiací je tedy vytvoření takové soustavy tenkých vrstev, jejíž činitel odrazu $\rho(\lambda) \rightarrow 1$ v okolí vlnové délky $\lambda = 10 \mu\text{m}$. Tato vlnová délka odpovídá podle Wienova zákona⁴ teplotě 20 $^{\circ}\text{C}$, tedy běžné pokojové teplotě. Jedině tím, že se infračervené záření odráží od povrchu, nedochá-

zí k jeho absorpci ve hmotě skla. Čím nižší emisivitu bude vrstva mít, tím vyšší odrazivosti lze v dané oblasti dosáhnout. Toto tvrzení je možné jednoduše zdůvodnit na základě platnosti Kirchhofova zákona⁴, principu zachování energie a již zmíněné skutečnosti, že sklo je pro dlouhovlnné záření nepropustným materiálem, tedy $\tau(\lambda) \rightarrow 0$, pro $\lambda \in \langle 5 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m} \rangle$. Potom lze vztah mezi odrazivostí a emisivitou v infračervené oblasti vyjádřit $\rho(\lambda) = 1 - \varepsilon(\lambda)$.

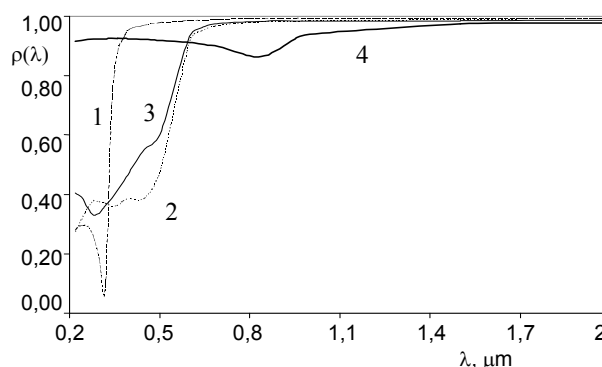
Emisivita je závislá na teplotě tělesa, tedy na vlnové délce záření, které dané těleso vysílá. Střední emisivita obyčejného skla v oblasti dlouhovlnného infračerveného záření je $\bar{\varepsilon} = 0,84$ (cit.⁵), tedy průměrná odrazivost se pohybuje kolem hodnoty $\bar{\rho} = 0,16$. Skla s nízkou emisivitou mají $\bar{\varepsilon} = 0,2$ až $0,1$ (cit.^{2,5}) i nižší, což ukazuje na vysoký činitel odrazu v průměru až $\bar{\rho} = 0,90$.

Měření v infračervené oblasti ukázala v případě vzorku B velmi vysokou odrazivost až $\bar{\rho} = 0,86$ a kolem vlnové délky $\lambda = 10 \mu\text{m}$ je $\rho(\lambda) = 0,91$ (viz obr. 2). Toto sklo se tedy opravdu chová jako infračervené zrcadlo.

4. Skladba tenkých vrstev pro infračervená zrcadla

Z předchozích úvah je zřejmé, že navrhovaná tenká vrstva musí mít maximální propustnost v oblasti viditelného záření $\lambda \in \langle 380 \text{ nm}, 780 \text{ nm} \rangle$, pro pracovní vlnovou délku $\lambda_c = 555 \text{ nm}$ a vysokou odrazivost v intervalu $\lambda \in \langle 5 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m} \rangle$.

Ušlechtilé kovy jako zlato, stříbro, měď, popřípadě jejich slitiny, mají vysokou odrazivost právě v infračervené oblasti⁶⁻⁹. Na obr. 3 je uveden průběh spektrálního činitele odrazu vybraných kovových vrstev (stříbro-Ag, zlato-Au, měď-Cu, hliník-Al) nanesených na skleněnou podložku metodou vakuového napařování⁹. Jak je vidět z obrázku, nejlepších vlastností z hlediska výběru materiálu pro tenké reflexní vrstvy pracující na principu infračervených zrcadel vykazuje stříbrná vrstva. U stříbra, je-li nanášeno v dostatečně tenké vrstvě, je zaručena vysoká propustnost ve viditelné oblasti a vysoká odrazivost



Obr. 3. Odraživost tenkých kovových vrstev v intervalu vlnových délek od 0,2 do 2,0 μm ; 1 – Ag, 2 – Au, 3 – Cu, 4 – Al

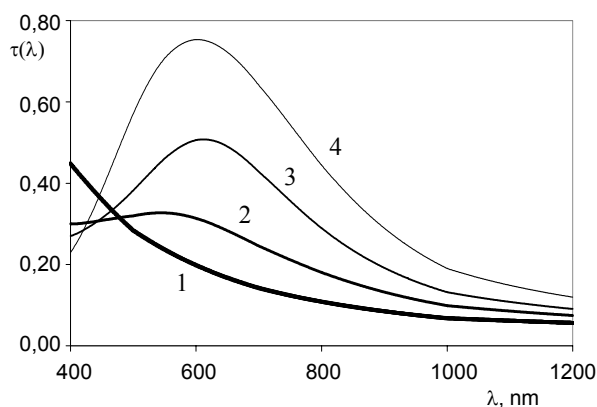
infračerveného záření. Zlatá vrstva má také v intervalu vlnových délek dlouhovlnného infračerveného záření vysokou reflexi, ale oproti stříbru má poněkud nižší propustnost ve viditelné oblasti, podobně jako vrstva měděná. Nižší propustnost viditelného záření je způsobena zvýšenou absorpcí v oblasti mezi UV-A a viditelným zářením³. Hliník pro účely IČ reflexních skel není zcela vhodným materiálem, neboť jeho vysoká odrazivost převažuje nejen v infračervené oblasti, ale také v oblasti viditelné, čímž je značně omezen prostup světla. Tenké hliníkové vrstvy však nacházejí uplatnění u reflexních tepelně izolačních materiálů.

Kromě zlata většina výše uvedených kovů na vzduchu oxiduje. Vlastnosti zoxidované kovové vrstvy se výrazně liší od požadovaných původních vlastností – značně se snižuje odrazivost. Proto se kovové vrstvy obkládají vrstvami dielektrickými, které plní funkci nejen ochrannou, ale také přispívají k jejich prosvětlení ve viditelné oblasti⁷.

Na následujícím obrázku je provedeno srovnání spektrálního činitele prostupu tenké vrstvy stříbra (tloušťka vrstvy $h=25$ nm) nanesené na sklo, dále téže stříbrné vrstvy s jedním i se dvěma dielektrickými obloženími, pro vlnové délky v intervalu $\lambda \in (300 \text{ nm}, 2500 \text{ nm})$.

Z obr. 4 lze usoudit, že na prosvětlení tenké kovové vrstvy má zásadní vliv právě přední dielektrické obložení.

Mezi nejčastěji používané materiály pro dielektrické vrstvy patří TiO_2 , SnO_2 , SiO_2 , ZrO_2 , MgF_2 , ZnS , Al_2O_3 (cit. ^{5,6,8,13}). Vhodnou kombinací dielektrických a kovových vrstev, optimálním návrhem jejich tloušťek a správně zvolenou technologií nanášení lze vytvářet soustavy tenkých vrstev, které pro zadanou oblast vlnových délek budou splňovat požadované vlastnosti. Při návrhu soustav tenkých vrstev pro úpravu optických vlastností zasklení musí být zvažovány následující požadavky:



Obr. 4. Spektrální propustnost $\tau(\lambda)$ tenké stříbrné vrstvy s dielektrickým obložení; 1 – stříbrná vrstva (tl. 25 nm) – sklo, 2 – stříbrná vrstva (tl. 25 nm) – dielektrická vrstva TiO_2 (tl. 45 nm) – sklo, 3 – dielektrická vrstva TiO_2 (tl. 45 nm) – stříbrná vrstva (tl. 25 nm) – sklo, 4 – dielektrická vrstva TiO_2 (tl. 45 nm) – stříbrná vrstva (tl. 25 nm) – dielektrická vrstva TiO_2 (tl. 45 nm) – sklo

- požadované hodnoty spektrálního činitele prostupu $\tau(\lambda)$ odrazu $\rho(\lambda)$ a pohlcení $\alpha(\lambda)$ pro zadaný interval vlnových délek λ ,
- indexy lomu jednotlivých vrstev,
- počet vrstev v soustavě,
- tloušťku kovové vrstvy i tloušťky dielektrického obložení,
- vlastnosti přizpůsobovací vrstvy při návrhu soustavy o více vrstvách¹².

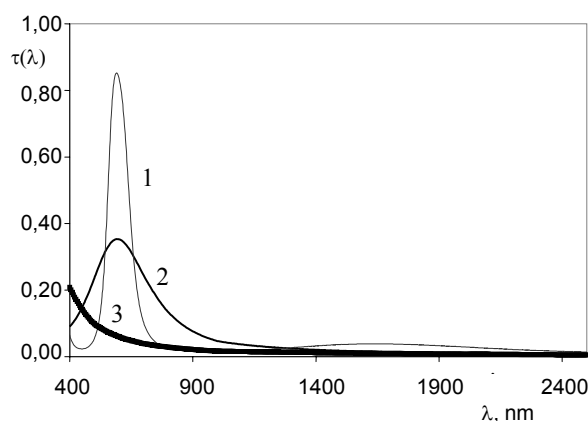
Index lomu jednotlivých vrstev je funkcí vlnové délky dopadajícího záření a jeho hodnota je ovlivňována chemickým složením materiálu, krystalickou strukturou vrstvy, množstvím absorbovaných vodních par a způsobem nanášení na podklad⁸. Index lomu ve skutečnosti závisí i na tloušťce vrstvy. Těto vlastnosti je možno úmyslně využít pro konstrukci nehomogenní vrstvy s definovaným profilem indexu lomu¹². V běžných případech se však tenká vrstva považuje za homogenní, tedy její index lomu se mění jen s vlnovou délkou, a v prostorové souřadnici zůstává konstantní. Absorbující materiály jsou charakterizovány komplexním indexem lomu $n = n - ik$, kde k je index absorpce. Kovy jsou silně absorbující materiály, u kterých se ve viditelné oblasti elektromagnetického záření snižuje propustnost (úměrně se zvětšující se tloušťkou kovové vrstvy) vlivem vysokého indexu absorpce^{3,7,9}. Tím lze také vysvětlit vyšší absorpci viditelného záření u vzorku B (viz obr. 1).

Na základě studia optických vlastností vybraných vzorků skel a výběru vhodných materiálů pro tenké vrstvy s vysokou odrazivostí v infračervené oblasti^{6,10,12,13} byly provedeny výpočty spektrálních charakteristik pomocí počítačového programu Film*Calc 3.03-Advanced Optical Thin Film Technology, FTG Software Associates, Princeton, USA. Tento program provádí výpočty spektrálních činitelů odrazu a prostupu jako funkce zadaných vlnových délek a určených úhlů dopadu pro zadané hodnoty indexů lomu zvolených materiálů a pro stanovené tloušťky tenkých vrstev.

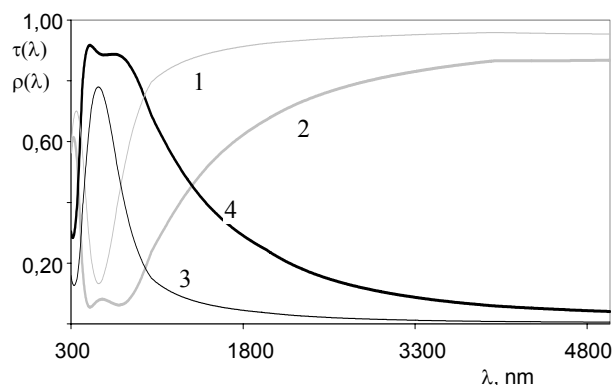
Výsledky počítačových hodnocení v podobě spektrálních činitelů odrazu $\rho(\lambda)$ a prostupu $\tau(\lambda)$ byly provedeny pro několik materiálových variant. Pro kovovou vrstvu se použilo stříbra (Ag), jehož vlastnosti byly v porovnání se zlatem (Au) a hliníkem (Al). Pro dielektrické vrstvy byl vybrán TiO_2 . Z výsledků počítačových hodnocení byla prováděna analýza vlastností navrhovaných soustav tenkých vrstev.

Z hlediska počtu vrstev v soustavě je možno dojít k následujícím poznatkům. Při návrhu soustavy tenkých vrstev o více než pěti vrstvách vycházela sice vysoká propustnost ve viditelné oblasti, ale jen ve velmi úzké části viditelného spektra, v rozsahu vlnových délek $\lambda \in (550 \text{ nm}, 650 \text{ nm})$ (viz obr. 5). Taková úprava zasklení by vytvářela barevný filtr, což jistě není žádoucí. Zmenšením počtu vrstev se sice propustnost snížila, ovšem spektrum propustnosti se rozšířilo na celou viditelnou oblast.

Tloušťka vrstev, zvláště kovových, výrazně ovlivňuje



Obr. 5. Vliv tenké kovové vrstvy a dielektrického obložení na spektrální propustnost $\tau(\lambda)$ tenkých vrstev; 1 – soustava tenkých vrstev: H-L-H-Ag-H-L-H, 2 – soustava tenkých vrstev: H-Ag-H, 3 – tenká vrstva: Ag; H – dielektrická vrstva s vysokým indexem lomu (TiO_2), L – dielektrická vrstva s nízkým indexem lomu (ZrO_2), Ag – vrstva stříbra



Obr. 6. Vliv tloušťky kovové vrstvy na optické vlastnosti tenkých reflexních filmů; 1 – odrazivost $\rho(\lambda)$ tenkého filmu: 36 nm TiO_2 – 25 nm Ag – 40 nm TiO_2 – sklo, 2 – odrazivost $\rho(\lambda)$ tenkého filmu: 36 nm TiO_2 – 10 nm Ag – 40 nm TiO_2 – sklo, 3 – propustnost $\tau(\lambda)$ tenkého filmu: 36 nm TiO_2 – 25 nm Ag – 40 nm TiO_2 – sklo, 4 – propustnost $\tau(\lambda)$ tenkého filmu: 36 nm TiO_2 – 10 nm Ag – 40 nm TiO_2 – sklo

Tabulka I

Tloušťky tenkých kovových vrstev vhodné pro infračervená zrcadla

Tloušťka tenké kovové vrstvy h	$\tau(555\text{nm})^a$	$\bar{\rho}$ pro $\lambda \in \langle 5\mu\text{m}, 50\mu\text{m} \rangle^b$	Vhodnost použití pro IR zrcadla
$h > 25\text{nm}$	$\tau(555\text{nm}) < 0,70$	$\rho \in \langle 0,90; 0,95 \rangle$	– ^c
$h \in \langle 10\text{nm}, 25\text{nm} \rangle$	$\tau(555\text{nm}) \in \langle 0,70; 0,85 \rangle$	$\rho \in \langle 0,85; 0,90 \rangle$	+ ^d
$h < 10$	$\tau(555\text{nm}) \in \langle 0,85; 0,90 \rangle$	$\rho \in \langle 0,80; 0,85 \rangle$	+, * ^e

^a $\tau(555\text{nm})$ – maximální propustnost τ ve viditelné oblasti pro pracovní vlnovou délku $\lambda = 555\text{ nm}$, ^b $\bar{\rho}$ pro $\lambda \in \langle 5\mu\text{m}, 50\mu\text{m} \rangle$ – střední hodnota odrazivosti v oblasti infračerveného záření $\lambda \in \langle 5\mu\text{m}, 50\mu\text{m} \rangle$, ^c nevhodné, nízká propustnost světla, ^d vhodné, ^e náročnější požadavky na technologii nanášení tenkých vrstev

propustnost viditelného záření. Bylo provedeno posouzení soustavy tenkých vrstev⁹, ve které se měnila tloušťka vrstvy stříbra. Tloušťka kovové vrstvy nad 35 nm výrazně snižovala prostup viditelného záření, teprve zmenšením tloušťky na 25 nm a méně bylo dosaženo požadované propustnosti. Velmi tenké vrstvy kovu o tloušťce 7 nm až 10 nm dávají vysokou světelnou propustnost, vyžadují však náročnější požadavky z hlediska technologie nanášení. Na obr. 6 je ukázka vyhodnocení spektrálních charakteristik soustavy tenkých vrstev s vrstvou stříbra tloušťky 10 a 25 nm.

Na základě výpočtů spektrální propustnosti $\tau(\lambda)$ navrhovaných soustav tenkých vrstev pro oblast vlnových délek viditelného záření $\lambda \in \langle 380\text{ nm}, 780\text{ nm} \rangle$, je možné stanovit následující doporučení pro návrh tenkých kovových vrstev vhodných pro infračervená zrcadla (viz tabulka I).

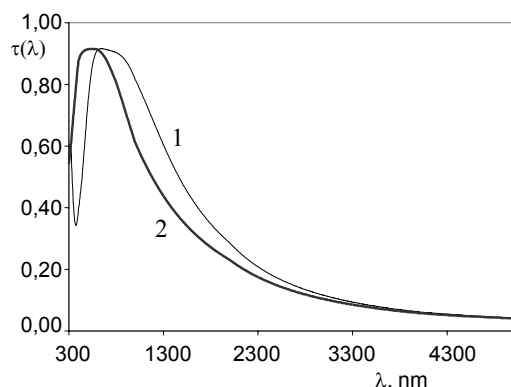
Obr. 7 zohledňuje především vliv tloušťky dielektrického obložení na spektrální propustnost soustavy tenkých vrstev v oblasti viditelného záření. Z obrázku je patrné, že dielektrické obložení v tloušťce větší jak 50 nm způsobilo posun maxima propustnosti za střed viditelné oblasti ($\lambda = 555\text{ nm}$).

Na základě počítačových hodnocení byly zjištěny podobné spektrální charakteristiky soustavy tenkých vrstev z obr. 6 a 7 se zlatou vrstvou stejné tloušťky. Ve srovnání se stejnou soustavou s vrstvou hliníkovou by pro dosažení obdobných optických vlastností ve viditelné oblasti musela mít hliníková vrstva tloušťku menší jak 5 nm.

Na obr. 8 je uvedena ukázka srovnání spektrální odrazivosti skla s navrženou soustavou tenkých vrstev obsahující vrstvu stříbra (45 nm TiO_2 – 25 nm Ag – 45 nm TiO_2) v porovnání se změřenými hodnotami spektrální odrazivosti nízkoemisivního skla – vzorek B z obr. 1 a 2.

5. Závěr

Na základě poznatků z výše popsané analýzy je možné sestavit požadavky pro návrh soustavy tenkých vrstev, pracujících na principu infračervených zrcadel pro úpravu optických vlastností okenních zasklení.



Obr. 7. Vliv tloušťky dielektrického obložení na optické vlastnosti tenkého reflexního filmu; 1 – propustnost $\tau(\lambda)$ tenkého filmu: 53 nm TiO_2 – 25 nm Ag – 54 nm TiO_2 – sklo, 2 – propustnost $\tau(\lambda)$ tenkého filmu: 36 nm TiO_2 – 25 nm Ag – 40 nm TiO_2 – sklo

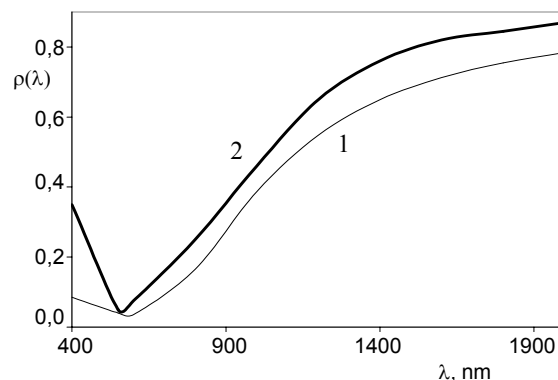
Jako nejjednodušší řešení se nabízí návrh třívrstvé soustavy se střední kovovou vrstvou a dvěma vrstvami dielektrickými. Dostatečná tloušťka celé soustavy se pohybuje kolem 100 nm, doporučená tloušťka tenké kovové vrstvy je 10 nm, doporučené tloušťky vrstev dielektrického obložení mezi 35 až 45 nm. Z hlediska spektrálního rozsahu, je žádoucí zajistit vysokou propustnost slunečního záření $\tau(\lambda) \rightarrow 1$ ve spektrální oblasti viditelného záření $\lambda \in (380 \text{ nm}, 780 \text{ nm})$ a vysokou odrazivost v oblasti dlouhovlnného infračerveného záření $\rho(\lambda) \rightarrow 1$, pro $\lambda \in (5 \text{ } \mu\text{m}, 50 \text{ } \mu\text{m})$.

Pro infračervená zrcadla se jako nejvhodnější materiály jeví pro kovové vrstvy stříbro a TiO_2 pro vrstvy dielektrické. Tyto materiály jsou dostupné a i finančně přijatelné. Výhody stříbrné vrstvy byly popsány u vlastností kovů. TiO_2 je materiál s vysokým indexem lomu, který lze nanášet jak metodou vakuového napařování, tak i teplotním či katodovým napařováním^{8,13}.

Děkuji doc. RNDr. Karlu Navrátilovi, CSc. z Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně za spektrální měření vzorků skel a RNDr. Pavlu Pokornému z Ústavu přístrojové techniky, AV ČR za cenné rady a umožnění přístupu k počítačovému programu Film*Calc 3.03, pomocí kterého byly provedeny výpočty spektrálních charakteristik tenkých vrstev pro analýzu optických vlastností materiálů vhodných pro úpravu zasklení pracujících na principu infračervených zrcadel.

Seznam symbolů

λ vlnová délka [m]
 $\rho(\lambda)$ spektrální činitel odrazu [–]
 $\tau(\lambda)$ spektrální činitel prostupu [–]
 $\alpha(\lambda)$ spektrální činitel pohlcení [–]
 ε spektrální emisivita [–]



Obr. 8. Srovnání spektrálních odrazivostí vzorku B (nízkoemisivní sklo) se sklem s navrženou soustavou tenkých vrstev; 1 – odrazivost $\rho(\lambda)$ nízkoemisivního skla – vzorek B, 2 – odrazivost $\rho(\lambda)$ skla s tenkým filmem: 45 nm TiO_2 – 25 nm Ag – 45 nm TiO_2 – sklo

$\bar{\rho}$ střední odrazivost (střední činitel odrazu) [–]
 $\bar{\varepsilon}$ střední emisivita [–]

LITERATURA

- Hutchins M. G.: Solar Energy 62, No. 3 (1998).
- Wigginton M.: *Glass in Architecture*. Phaidon Press, London 1996.
- Balcomb J. D.: *Passive Solar Buildings – Solar Heat Technologies and Applications*. The MIT Press, Cambridge 1992.
- Modest M.: *Radiative Heat Transfer*. The Pennsylvania State University Press, USA 1993.
- Johnson E. T.: *Low-E Glazing Design Guide*. Butterworth Architecture, Boston 1991.
- Berning P. H.: Applied Optics 22, No. 24 (1983).
- Born M., Wolf E.: *Principles of Optics*. The University Press, Cambridge 2003.
- Eckertová L.: *Physics of Thin Films*. Plenum Press, New York 1990.
- Gray D. E.: *American Institute of Physics Handbook*. McGraw-Hill Book Company, New York 1972.
- Knittl Z.: *Optics of Thin Films*. John Wiley & Sons, London 1976.
- Krpaťa F.: *Aplikovaná optika*. Vydavatelství ČVUT Praha, Praha 1997.
- Křepelka J.: *Optika tenkých vrstev*. Skriptum Přírodovědecké fakulty UP Olomouc, Olomouc 1993.
- Yoldas B. E.: Applied Optics 23, No. 20 (1998).

J. Mohelníková (*Faculty of Civil Engineering, Technical University, Brno*): **Materials for Thin Layers of Infrared Mirrors**

Glasses with deposited IR-reflective thin films on one of their surfaces operate as heat mirrors. The films improve optical properties of glazings and, compared with ordinary clear glasses, reduce heat radiation losses. The design of thin reflective coatings is based on the theory of optics of thin films. Optical properties of the films are defined by spectral characteristics such as reflectance,

transmittance and absorptance for a given wavelength. The paper deals also with classification of the materials suitable for IR-reflective thin films. Spectral reflectance measurements of glass samples were carried out to determine their optical properties in the spectral range of solar radiation (300–2500 nm) and in the long-wave IR region (5–11 μm). Spectral optical properties of IR-reflective coatings were calculated for different compositions of the films to obtain coatings with very high light transmittance and IR reflectance.