Spektrálisan szelektív és víztaszító TiO_2- és SiO_2-szol-gél bevonatok fejlesztése széles tiltott sávú napelemek védőburkolatára

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS

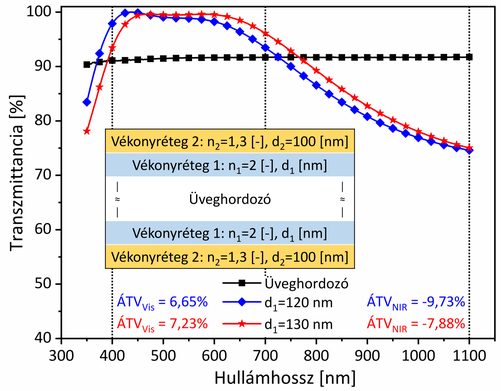
KOVÁCS Kinga, NAGY Norbert, ZÁMBÓ Dániel, HÓRVÖLGYI Zoltán, ALBERT Emőke

Energiatudományi Kutatóközpont

Célkitűzés

A munka célja olyan multifunkcionális, spektrálisan szelektív vékonyréteg-rendszerek fejlesztése széles tiltott sávú napelemek védőüvegeire, amelyek a közeli infravörös (NIR) sugárzás intenzitásának csökkentésével mérséklik a parazita abszorpció okozta energiaátalakítási hatékonyság degradációt, növelik a hasznosítható látható fény áteresztését, valamint környezeti ellenállóságot és vízlepergető, öntisztuló felületet biztosítanak.

Optimális optikai paraméterek meghatározása



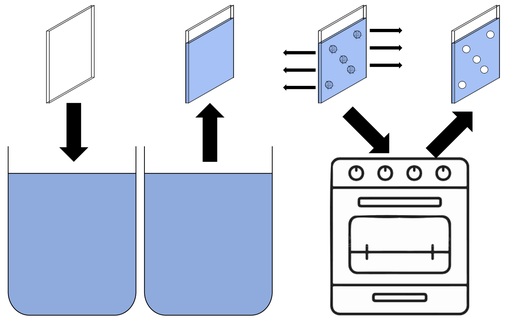
Vékonyrétegek előállítása

Szol-gél eljárás

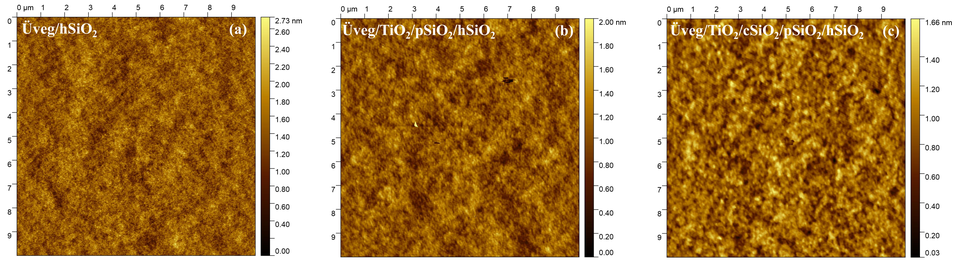
Mártásos technika („dip-coating”)

Etanolos közegben savkatalizált kontrollált hidrolízis és polikondenzáció:

- TiO_2: Titán(IV)-butoxid
- $cSiO_2$: Tetraetil-ortoszilikát (TEOS)
- $pSiO_2$: TEOS
- $hSiO_2$: TEOS + Metiltrietoxiszilán

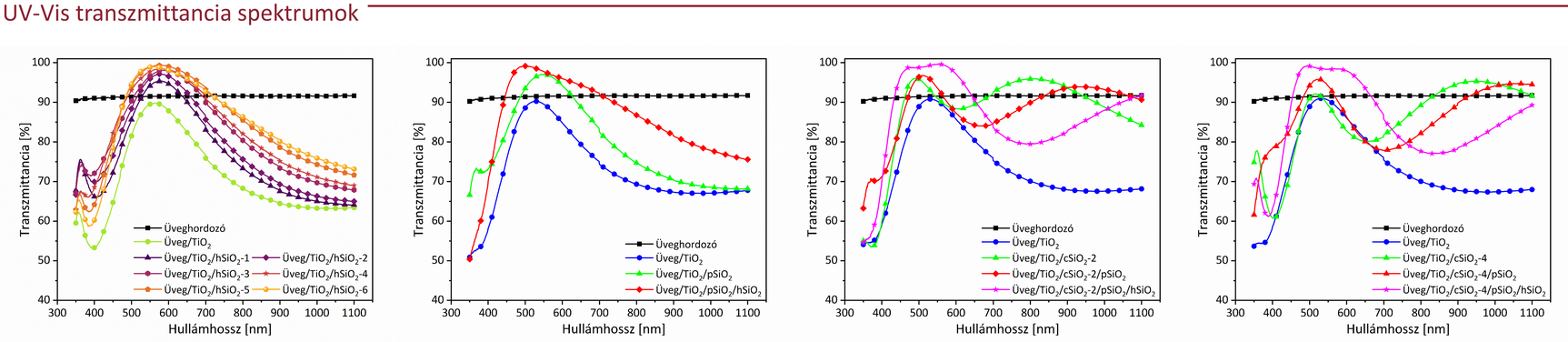


Atomerő-mikroszkópia

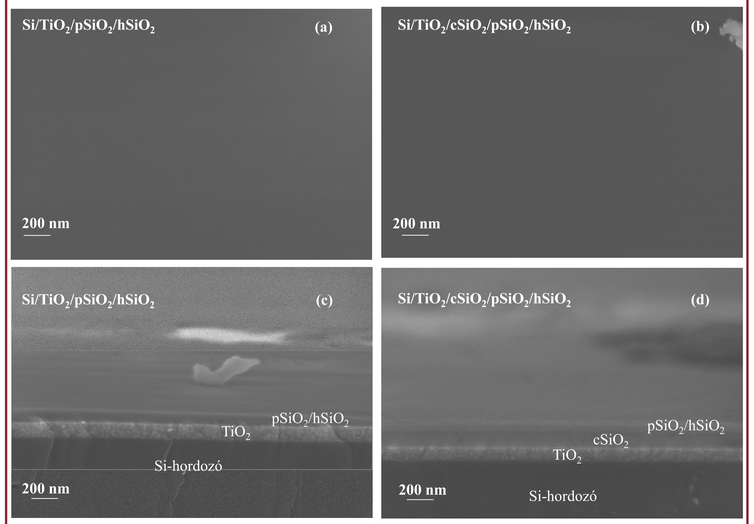


Minta	Sq [nm]	Sa [nm]
Üveg/$hSiO_2$	0,274	0,218
Üveg/TiO_2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	0,194	0,155
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$/$pSiO_2$/$hSiO_2$	0,198	0,159

UV-Vis transzmittancia spektrumok



Pásztázó elektronmikroszkópia



Vékonyréteg-optikai modellekkel meghatározott optikai paraméterek

Minta	Első réteg			Második réteg		
	n [-]	p [%]	d [nm]	n [-]	p [%]	d [nm]
Üveg/TiO_2/$hSiO_2$-5	2,078 ± 0,041	14 ± 2	139 ± 4	1,187 ± 0,031	56 ± 7	127 ± 14
Üveg/TiO_2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	2,081 ± 0,005	14 ± 0	124 ± 1	1,195 ± 0,021	55 ± 5	68 ± 4
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$-2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	2,085 ± 0,008	14 ± 0	124 ± 1	1,424 ± 0,007	7 ± 1	131 ± 1
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$-4/$pSiO_2$/$hSiO_2$	2,083 ± 0,005	14 ± 0	123 ± 1	1,409 ± 0,006	10 ± 1	166 ± 1

Átlagos transzmittancia változás és maximális transzmittancia

Minta	$ÁTV_{Vis}$	$ÁTV_{NIR}$	T_{max}	$\lambda(T_{max})$
Üveg/TiO_2/$hSiO_2$-5	0,3 ± 0,2	-11,7 ± 1,0	99,3 ± 0,4	579 ± 8
Üveg/TiO_2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	2,3 ± 0,4	-9,4 ± 0,6	99,2 ± 0,1	498 ± 4
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$-2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	2,3 ± 0,2	-7,8 ± 0,2	99,6 ± 0,1	554 ± 5
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$-4/$pSiO_2$/$hSiO_2$	0,8 ± 0,2	-10,4 ± 0,2	98,9 ± 0,2	495 ± 1

Felületi nedvesíthetőség: Vízperemszög értékek

Minta	Θ_A (°)	Θ_R (°)	H (°)	Θ_{Young} (°)
Üveg/TiO_2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	87 ± 1	78 ± 1	9 ± 1	83 ± 1
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$-2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	84 ± 1	78 ± 2	7 ± 1	81 ± 2
Üveg/TiO_2/$cSiO_2$-4/$pSiO_2$/$hSiO_2$	85 ± 2	79 ± 2	6 ± 1	82 ± 2
Si/TiO_2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	68 ± 3	60 ± 4	8 ± 2	64 ± 3
Si/TiO_2/$cSiO_2$-2/$pSiO_2$/$hSiO_2$	64 ± 2	57 ± 1	7 ± 2	61 ± 2
Si/TiO_2/$cSiO_2$-4/$pSiO_2$/$hSiO_2$	61 ± 4	52 ± 5	9 ± 2	56 ± 4

Ellipszometriai porozimetria

Minta	Nyitott porozitás [%]	Pórus sugár [nm]			
		Mikropórusok		Mezopórusok	
		adszorpció	deszorpció	adszorpció	deszorpció
Si/TiO_2	8	0,5	0,5	4,8	2,6
Si/c-SiO_2	5	0,7	0,6	-	-
Si/p-SiO_2	43	0,4	0,7	4,1	2,8
Si/h-SiO_2	44	0,7	0,8	1,6	1,6

Összefoglalás

Spektrálisan szelektív, többrétegű vékonyréteg-rendszer előállítása a szimulációval meghatározott optimális szerkezet módosításával. A rétegképzés során a kihúzási sebesség korlátozó hatásának kiküszöbölése: a kétszeri mártással bevont minták optikailag homogének. A minták – az alacsony peremszög hiszterézisnek köszönhetően – víztaszító tulajdonságot mutatnak, homogén felülettel rendelkeznek.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Semilab Félvezető Fizikai Laboratórium Zrt.-nek, amiért lehetővé tette a spektroszkópiai ellipszometriai és ellipszometriai porozimetriai mérések elvégzését. Köszönjük Kovács Leventének az optikai modellek programozásában nyújtott segítséget.

Referencia

Elfogadott cikk: Kovács, K., Madarász, J., Nagy, N., Zámbó, D., Hórvölgyi, Z., Albert, E. (2026). Nanostructured Titania–Silica Sol–Gel Multilayer Coatings with Spectrally Selective Light Transmission and Water-Repellent Functionality. Applied Surface Science Advances (IF: 10.0)

Albert, E., Basa, P., Fodor, B., Keresztes, Z., Madarász, J., Márton, P., Olasz, D., Rácz, A. S., Sáfrán, G., Szabó, T., Tegze, B., Höltzl, T., & Hórvölgyi, Z. (2025). Experimental and Computational Synthesis of TiO_2 Sol–Gel Coatings. Langmuir, 41(1), 704–718. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c03959