

Záróbeszámoló

K_128266, „Broadband photoactivity of semiconductor sol-gel coatings”

Kutatómunkák során fotoaktív tulajdonságú mezopórusos félvezető oxid (ZnO és TiO₂) alapú vékony bevonatokat fejlesztettünk. A fotoaktivitás növelésére és annak működési hullámhossztartományának kiterjesztésére, valamint új, gyakorlati szempontokból hasznos tulajdonságok (fényáteresztés növelés, hőmérséklet- és fotoreszponzív viselkedés) elérésére különböző adalékokat (ezüst-, réz- és réz-oxid részecskék, felkonvertáló részecskék, színezékek) alkalmaztunk. Tanulmányoztuk a bevonatok pórusrendszerében jelen levő nanoméretű szűk terekben fellépő jelenségek, valamint ezen folyamatok és a bevonatok fotoaktivitása közötti összefüggéseket.

Az alábbiakban összefoglaljuk legfontosabb eredményeinket, a különböző legfontosabb tanulmányozott anyagi rendszerek szerint. A kutatási eredményekből 14 folyóiratcikk, 1 konferenciaközlemény, 1 PhD értekezés és 41 BSc-s és MSc-s hallgatók által írt szakdolgozat, diplomamunka és tudományos diákköri dolgozat született. Továbbá az eredményeket 7 konferencián mutattuk be (6 nemzetközi, 2 hazai), melyekre összesen 12 poszter és 8 szóbeli előadás készült a kutatás eredményeiből.

TiO₂ és TiO₂/Ag kompozit szol-gél bevonatok

A fotokatalitikus tulajdonságú TiO₂ bevonatok fejlesztése során elsőként célunk volt a megfelelő pórusos szerkezettel nagy fajlagos felület elérése az átlátszóság megtartása mellett, továbbá a fotoaktivitás növelése, melyhez ezüsttel való adalékolást alkalmaztunk.

Különböző pórusrendszerű mezopórusos TiO₂, és ezüsttel adalékolt TiO₂ bevonatokat készítettünk a szol-gél mártásos, illetve forgótárcsás módszerekkel, jellemzően szilika védőréteggel ellátott üveghordozók felületére. Tanulmányoztuk színezékek adszorpciós és deszorpciós folyamatait a bevonatok pórusrendszerében, vizes oldatokból való impregnálással (különböző pH értékek mellett), illetve vízbe való kiáramlás nyomon követésével. A színezékek fotodegradációját részletesen vizsgáltuk: végeztünk méréseket szilárd-folyadék határfelületeken, a mintákat színezék-oldatokba helyezve; illetve szilárd-levegő határfelületeken, színezékkel impregnált bevonatok bevilágításával; UV (fotokatalízis) és látható fényű (színezék-érzékenyítés) bevilágítást is alkalmazva. A minták optikai tulajdonságait UV-Vis spektroszkópiával, kristályszerkezetét röntgendiffrakcióval (XRD) vizsgáltuk, és részletesen tanulmányoztuk a minták nedvesedési tulajdonságait víz peremszög-méréssel, az ülcsepp-, captive bubble és a folyadékidas módszerek alkalmazásával. Együttműködésben más egyetemi csoportokkal, illetve kutatóintézetekkel, további műszeres vizsgálatokat is elvégeztünk (fluoreszcencia spektroszkópia, ellipszometriai-porozimetria, XPS, RBS, HR-TEM).

Eredményesen kialakítottuk a kívánt átjárható, egységes szerkezetű, nagy porozitású TiO₂ mezopórusos bevonatokat, a pórusszerkezet tulajdonságait a pórusképző templát anyagok megválasztásával szabályoztuk. Színezékadszorpciós kísérletek során megmutattuk, hogy a bevonatok pórusrendszere a színezékmolekulák számára átjárható, és kationos színezékek nagy

mennyiségben képesek megkötődni a pórusokban. Azt találtuk, hogy a színezékek monomerek és asszociált formákban (dimerek, trimerek stb.) kötődnek meg a felületen, és a színezékasszociáció mértéke befolyásolható a kialakított pórusszerkezettel, a pórusok méreteivel. A bevonatok jelentős fotoaktív tulajdonságot mutattak UV fény alatt, továbbá bizonyos színezékmolekulák (Rodamin 6G, R6G) esetében látható fényben is bekövetkezett a színezékbomlás, köszönhetően a színezék-érzékenyítés jelenségének. A színezékdegradáció levegő-szilárd határfelületen való vizsgálata mezopórusos bevonatokban egy olyan mérési elrendezés és modell-rendszer, amely a gyakran alkalmazott oldatban végzett vizsgálatokkal szemben alkalmas a színezékmolekulák különböző formáinak (monomerek, dimerek stb.) fényel szembeni stabilitásának tanulmányozására. Az asszociált színezékmolekulák fotostabilitása minden esetben jelentősen nagyobbak bizonyult, mint a monomereké. [1]

A kialakított mezopórusos TiO_2 bevonatokba különböző paraméterek ezüst részecskék leválasztását valósítottuk meg, az adalékolási és utókezelési paramétereket optimalizáltuk (hőkezelések száma, időtartama, hőmérséklete; UV kezelések alkalmazása) annak érdekében, hogy az ezüst redukció minél nagyobb mértékben végbemenjen, és a minták fotoaktivitása a lehető legnagyobb legyen. A prekursor szolokból készített pormintákon XRD méréseket végezve meghatároztuk az elkészítés során alkalmazott paraméterek hatását a kialakuló kristályszerkezetre, mely főként anatáz volt, egyes esetekben kis mennyiségű rutil tartalom mellett. A TiO_2 és TiO_2/Ag szol-gél bevonatok nedvesedési tulajdonságainak tanulmányozása során azt találtuk, hogy UV illetve látható fényű besugárzásra reverzibilisen megváltozott a minták vízzel való nedvesíthetősége, és ez a folyamat befolyásolható volt a minták összetételével. [2]

Megállapítottuk, hogy az ezüst jelenléte a legtöbb esetben jelentősen megnövelte a fotoaktivitást: ez a hatás jobban érvényesült a szilárd-folyadék határfelületen végzett mérések során, mint a szilárd-levegő határfelületi fotodegradáció esetében, ahol nagyobb mennyiségű ezüst jelenléte bizonyos mintáknál akár a fotoaktivitás csökkenését is okozta. A pórusszerkezet közvetett módon befolyásolta a fotoaktivitást: egyrészt az AgNO_3 oldatban impregnált minták esetében a felvett ezüst mennyiség függ a pórusok méretétől, a kisebb pórusok nagyobb ezüst tartalomhoz és így jelentősebb fotoaktivitás növeléshez vezettek. Másrészt a színezékasszociáció mértéke erősen függ a színezék típusa mellett a pórusszerkezettől, valamint az ezüst jelenlététől is a pórusokban. Ezüst jelenlétében a fotodegradáció mérése alatt a bevilágítás hatására jelentősebb színezékasszociációt tapasztaltunk. Ez az asszociációra hajlamos színezékeknél, nagyobb pórusméretű mintáknál, és magasabb ezüsttartalom esetében a fotodegradációs sebesség csökkenéséhez vezetett. Az ezüst adalékolási módszer és paramétereinek megfelelő beállításával, valamint a megfelelő pórusszerkezettel előállítottunk olyan bevonatokat, melyek látható vagy UV fény alatt kiemelkedően jó fotoaktivitást mutattak. [3] A fotokatalizátor rendszerek stabilitását ismételt színezékdegradációs tesztekkel vizsgáltuk, és megállapítottuk, hogy az újrafelhasználhatósághoz fontos volt az elegendően magas ezüsttartalom, mivel vizes közeggel való hosszú idejű érintkezés után az ezüst részecskék egy része ezüst-ionokként az oldatba diffundált. [2,4]

Cu_xO bevonatok és Cu₂O vagy Cu-tartalmú TiO₂ kompozit szol-gél bevonatok

Látható fényben is hatékony fotoaktivitást mutató rendszerek kialakítása érdekében Cu_xO vékonyrétegeket, és Cu₂O és/vagy Cu nanorészecskékkel adalékolt TiO₂ bevonatokat alakítottunk ki üveghordozókon. A Cu és Cu₂O részecskéket különböző redukálószerrel (monoetanol-amin, glükóz, aszkorbinsav) alkalmazva választottunk le vizes közegben, továbbá ecetsavas biopolimer (kitozán) oldatban is, utóbbi esetben Cu-tartalmú kitozán bevonatok kialakítása érdekében. A részecskéket etanos közegből vagy a kitozánt tartalmazó elegyekből impregnálással és forgótárcsás módszerekkel vittük föl mezopórusos TiO₂ szol-gél bevonatokat felületére. Előállítottunk olyan kompozit rendszereket is, amelyek esetében a Cu, illetve Cu₂O nanorészecskéket in-situ választottuk le a TiO₂ bevonatok pórusaiban, különböző szintézis körülményeket alkalmazva. Vizsgáltuk az előállítási körülmények (pH, hőmérséklet, alkalmazott redukálószer, komponensek aránya, leválasztás módja) hatását a kialakított nanorészecskék tulajdonságaira, melyeket optikai spektroszkópiai, TEM, SEM és XRD módszerekkel jellemeztünk. A fotoaktivitást UV és látható fényben végzett metilnarancs színezék fotodegradációs kísérletekben vizsgáltuk, utóbbi esetben H₂O₂ ko-katalizátort alkalmaztunk.

A CuO és/vagy Cu₂O szol-gél bevonatok előállítási paramétereit (hőkezelés és bevonatképzés paramétereit, felvitt rétegek száma) optimalizáltuk, így sikerült elegendően vastag, egybefüggő, kristályos bevonatokat kialakítani, melyben az XRD mérések kimutatták a Cu₂O és CuO jelenlétét is. Polimer adalékanyagok különböző mennyiségben való hozzáadásával a bevonatok vastagsága és homogenitása növelhető volt, valamint a Cu₂O mennyiségének arányát is növelni tudtuk a rendszerben. [5]

A megfelelő fotoaktivitás elérése érdekében előállítottunk TiO₂/Cu és/vagy Cu₂O kompozit rendszereket is, és meghatároztuk ezek legfontosabb jellemzőit. A Cu- és/vagy Cu₂O-részecskékkel adalékolt TiO₂ bevonatok minden esetben jelentős fotoaktivitást mutattak látható fény alatt, H₂O₂ ko-katalizátor alkalmazása mellett, míg az adalékolatlan TiO₂ minták esetében csak elhanyagolható mértékű színezékbomlást tapasztaltunk. A fotoaktivitás mértéke és az optikai tulajdonságok jelentősen függtek a részecskék előállítási (pH, hőmérséklet, tartózkodási idő) és a felületre való leválasztási körülményeitől. A kisebb pH, a nagyobb hőmérséklet és a hosszabb reakcióidő a Cu-részecskék keletkezésének kedvezett, ezen paramétereket ellentétesen változtatva Cu₂O-részecskék váltak le, és egy bizonyos tartományban Cu- és Cu₂O-részecskék keverékének előállítása is lehetséges volt. Fontos eredmény, hogy a Cu vagy a Cu₂O-részecskék jelenléte UV-fényben is növelte a TiO₂ fotoaktivitását, amennyiben a felületi borítottságot megfelelően szabályoztuk, tehát a TiO₂ bevonatok Cu és/vagy Cu₂O-dal való adalékolásával látható és UV fényben egyaránt fotoaktív rendszereket tudunk fejleszteni. [6-9]

ZnO és TiO₂ tartalmú, fényáteresztést növelő és fotoaktív bifunkcionális szol-gél bevonatok

Különböző összetételű, vastagságú és porozitású ZnO/SiO₂ és TiO₂/SiO₂ kevert oxid bevonatokat és többrétegű rendszereket állítottunk elő üveghordozókon a szol-gél mártásos módszerrel. A SiO₂-dal való társítás célja a jelentős fényáteresztés növelő hatás elérése, miközben a fotoaktív tulajdonságot megőrizni kívánjuk. Előállítottunk több összetétel mellett ZnO/SiO₂ bevonatokat, melyek a bevonat nélküli üveghordozóhoz képest nagyobb transzmittanciát mutattak, és a

színezékdegradációs tesztekben bizonyítottuk fotokatalitikus aktivitásukat is. A legjobb eredményeket a 30 mol% ZnO tartalmú minták mutatták, melyek nagy fényáteresztéssel és jelentős fotoaktivitással rendelkeztek, és vízzel szemben tökéletes nedvesítést mutattak, mely például öntisztító bevonatként való alkalmazás esetében előnyös tulajdonság. A fotoaktivitás további növelése érdekében többrétegű rendszereket is előállítottunk: az üveghordozóra háromrétegű bevonatot vittünk fel, ahol az első réteg egy kompakt szilika bevonat, erre egy pórusos szilika réteg, végül pedig egy pórusos ZnO réteg kerül. A ZnO réteg a nagy fotoaktivitásért felel, a szilika rétegekkel pedig a megfelelő törésmutató változást, és így magas fényáteresztést kívántuk elérni. A kialakított háromrétegű rendszerek mindegyike mutatott fényáteresztés növelő hatást és fotokatalitikus aktivitást is. A bevonatok előállítási paramétereinek (pórusképző adalékanyag, réteghúzási sebesség, hőkezelési program) megfelelő szabályozásával két kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkező rendszert sikerült kifejlesztünk, az egyik PVP (polivinilpirrolidon) K90 (MW: 360.000), a másik PVP K30 (MW: 40.000) pórusképző anyaggal készült. A ZnO bevonat kristályosságának mértéke, és ezzel összefüggésben a fotoaktivitása erősen függött az alkalmazott pórusképzőtől, melyben a PVP K90 adalékanyag nyújtotta a legjobb eredményt. A PVP K30 adalékanyag esetében kicsit szerényebb, de még mindig jelentős fotoaktivitás volt tapasztalható, és emellett nagyobb fényáteresztés növelő hatás volt elérhető, de elmondható, hogy mindkét rendszer esetében a 400-800 nm között meghatározott átlagos integrális transzmittancia-növekedést jellemző paraméter megközelítette az 5%-ot. [10]

A kialakított $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ rendszerek közül a legmagasabb fényáteresztést a 35 mol% TiO_2 tartalmú bevonatok mutatták, köszönhetően magas porozitásuknak, és a minták fotoaktív tulajdonságát is bizonyítottuk. A TiO_2 és a kompozit $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ minták nedvesedésének vizsgálatát víz-peremszög értékek meghatározásával az ülőcsepp-, a tapadó buborék, és a kapilláris szonda módszerekkel végeztük. A dinamikai vizsgálatok megmutatták, hogy a peremvonal tapad-csúszik típusú mozgással halad, míg hátráló esetben erősen megtapad. Mindez a bevonat szeparált, hidrofil hibahelyeire utal. Részletesen vizsgáltuk a minták fotoreszponzív viselkedését: mindegyik $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ kompozit bevonat mutatatta a jelenséget, de a tiszta TiO_2 referencia mintához képest kisebb mértékben. [11,12]

A kiemelkedő fotokatalitikus tulajdonságot mutató TiO_2 bevonatok pórusszerkezetét a bevonat előállítási körülményeivel szabályoztuk annak érdekében, hogy a nagy fotoaktivitás mellett fényáteresztés növelő hatást is elérhessünk. A bevonatképzést követő utókezelési lépések paramétereit szabályoztuk, valamint a szárítás és hőkezelési lépések között egy új lépést is alkalmaztunk, melynek során telített vízgőz atmoszférában öregítettük a mintákat. A szol-gél bevonatok pórusszerkezetének szabályozásával kiemelkedő fényáteresztés növelő hatás érhető el, melyet részletesen vizsgáltunk elsőként mezopórusos szilika modellrendszereken. [13-16] Az eredmények szerint az így kifejlesztett kezelés megnöveli a TiO_2 bevonatok porozitását is, a pórusrendszer pseudomorfné transzformációja révén, és ezáltal a minták fényáteresztése is jelentősen növekszik. Az így készült TiO_2 bevonatok nagy fotokatalitikus aktivitást mutattak, és a porozitás megnövelésének hatására az üveghordozóhoz képest nagyobb fényáteresztést értünk el:

az átlagos transzmittancia-növekedést jellemző paraméter 400-800 nm között 2%-nak adódott. [17,18,19]

Felkonvertáló nanorészecske tartalmú fotoreszponzív bevonatok

Célunk volt olyan fénymoduláló kolloidrészecskék és kompozit bevonat rendszerek fejlesztése, melyek többek között hasznosak lehetnek fotokatalizátorok működési hullámhossztartományának kibővítésére. Az úgynevezett felkonvertáló részecskék képesek közeli infravörös (NIR) fényt UV és látható fényre alakítani, így olyan fotoaktív bevonatok fejlesztése válik lehetségessé, melyek a napfény NIR tartományát is kihasználják. További fontos szerepe lehet a színezékmolekuláknak, mivel a színezék-érzékenyítés jelenségét kihasználva a látható fényben is fotoaktív félvezető bevonatok alakíthatók ki. Célunk volt felkonvertáló nanorészecskék és különböző beágyazó közegű kompozit bevonataik előállítására, valamint TiO₂/felkonvertáló részecske/színezék kompozit rendszerek kialakítása. Kísérleteink során lantanoida ionokkal (Yb és Er vagy Tm) adalékolt NaYF₄ és LaF₃ nanorészecskéket, és SiO₂, TiO₂ és biopolimer (kitozán) mátrixú vékony bevonataikat állítottuk elő. A részecskék etanol illetve víz közegű szuszpenzióját, valamint a különböző kompozit bevonatokat XRD, TEM, dinamikus fényszórás, optikai spektroszkópia és fluorimetria módszerekkel jellemeztük.

A részecskék előállítása során optimalizáltuk a dópoló ionok koncentrációját, az előállítási paramétereket és a mosási lépéseket, a megfelelő szintézis termék eléréséhez. Az előállított nanorészecskék mutatták a kívánt felkonvertáló tulajdonságot, 980 nm-es NIR besugárzás hatására látható és UV tartományba eső emissziót adtak. Felkonvertáló nanorészecske/TiO₂ kompozit rendszereket alakítottunk ki különböző módokon: 1) Core-shell nanorészecskék előállítása - a felkonvertáló részecskék bevonása egy TiO₂ héjjal. 2) Felkonvertáló részecskék elosztatása TiO₂ beágyazó közegben. 3) Kitozán beágyazó közegű felkonvertáló részecskéket tartalmazó bevonatok felvitele mezopórusos TiO₂ bevonat felületére. A kompozit bevonatok mátrixaként használt kitozán a biológiai környezet nagyon egyszerű modelljeként is felfogható, ezért gyakorlati szempontból is fontos ilyen minták vizsgálata. A kitozán bevonatok előállítási körülményeit, különböző utókezelések hatását a szerkezetre és permeabilitásra részletesen vizsgáltuk. Különböző mértékben N-acetilézett kitozán-bevonatokat fejlesztettünk, és vizsgáltuk áteresztőképességüket színezékoldatokkal szemben. Azt találtuk, hogy kationos színezékek vizes oldata számára átjárható a kitozán bevonat, ami lehetővé tette a későbbi színezék molekulákkal szembeni energiaátadási folyamatok vizsgálatát a bevonatok színezékoldatba helyezésével. [20-24]

A megfelelő előállítási körülményekkel kialakított kompozit rendszerek esetében a NaYF₄:Yb,Tm/Er felkonvertáló nanorészecskék a kitozán mátrixú bevonatban továbbra is mutatták a kívánt emissziós csúcsokat. Ezzel szemben a TiO₂ bevonatba bevitt részecskék kisebb emissziót mutattak, magas hőmérsékletű (480 °C-os) hőkezelés alkalmazása esetében az emisszió teljesen megszűnt. A LaF₃:Yb,Tm/Er részecskék esetében fontos hatása volt az előállítást követő hőkezelési lépésnek a tulajdonságokra, a felkonvertáló emisszió intenzitása a 400 °C-os hőkezelés hatására bizonyult a legjobbnak: az eredmények szerint alacsonyabb hőmérsékleten nem elég nagy a kristályosság mértéke, magasabb hőmérsékleten pedig nemkívánatos

melléktermékek keletkeznek, továbbá a részecskék mérete is jelentősen megnőtt. Az optimális módon hőkezelt rendszerek jelentős felkonvertáló emissziót mutattak a látható, és a Tm ionokkal adalékolt rendszerek esetében az UV tartományban is. [25] A $\text{LaF}_3\text{:Yb,Tm/Er}$ részecskék TiO_2 , illetve SiO_2 szol-gél bevonatokba ágyazva is megőrizték jelentős felkonvertáló emissziójukat, míg mindegyik rendszer nagy emissziót mutatott kitozán mátrixanyagú bevonatok kialakítása esetében. [26]

A legnagyobb intenzitású felkonvertáló emissziót mutató kiválasztott részecskéket és kompozit bevonataikat R6G színezékoldatokba helyeztük és mértük az emissziót 980 nm-es besugárzás hatására. Azt tapasztaltuk, hogy emissziós spektrumokon megjelentek a felkonvertáló részecskékre jellemző csúcsok, és emellett megjelent a R6G fluoreszcens emissziós csúcsa is 554 nm-en. A jelenséget részletesebben vizsgáltuk különböző koncentrációjú színezékoldatokban szuszpendált felkonvertáló részecskék fluorimetriás mérésével: a színezékoldat koncentrációjának növekedésével a felkonvertáló emissziós csúcsok közül a 480 nm-es csúcs folyamatosan csökken, miközben a színezék 554 nm-es fluoreszcencia csúcsa folyamatosan nő, ami bizonyítja az energia átadást (Förster-féle rezonáns energiaátadás) a részecskék és a színezékmolekulák között. Vizsgáltuk a TiO_2 héjjal rendelkező core-shell részecskéket is, melyek mutatták a magra jellemző felkonvertáló emissziós csúcsokat, és az UV emisszió jelentős csökkenését tapasztaltuk, ahogy a TiO_2 felé lezajlott az energiaátadás, valamint ezen részecskéket tartalmazó rendszerek esetében is megfigyelhető volt az energiaátadás a felkonvertáló részecskék és a R6G színezékmolekulák között. További érdekes eredmény, hogy a $\text{NaYF}_4\text{:Yb,Tm/Er}$ részecskék, és kitozán mátrixú kompozit bevonataik emissziós intenzitása jelentősen függött a mérés hőmérsékletétől, emelkedő hőmérséklet hatására csökkent az emisszió, így az ilyen rendszerek hőmérsékletszenzorként is alkalmazhatóak. Ez a jelenség a szuszpenzió közegétől is függött, vizes közegben az emisszió intenzitása jelentősen és irreverzibilisen csökkent, mivel a vízben korróziós folyamatok is lejátszódnak. [27-31]

Irodalomjegyzék: A projekt eredményeiből készült legfontosabb publikációk

- [1] B. Tegze, E. Albert, B. Fodor, G. Sáfrán, Z. Hórvölgyi, Dyes and Pigments, 167 (2019) 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.04.017>; IF = 4.613; Q1;
- [2] Tegze, E. Albert, B. Dikó, J. Madarász, G. Sáfrán, Z. Hórvölgyi, Studia UBB Chemia, LXIV, 3, (2019), 81-98. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2019.3.07>; IF = 0.494; Q4;
- [3] B. Tegze, E. Albert, B. Dikó, N. Nagy, A. Rácz, G. Sáfrán, A. Sulyok, Z. Hórvölgyi, Nanomaterials, 11 (2021) 2240. <https://doi.org/10.3390/nano11092240>; IF = 5.719; Q1;
- [4] Tegze B.: Nanoszerkezetű TiO_2 szol-gél bevonatok fotoaktivitása (2022) PhD értekezés
- [5] Draskóczy Á., Tegze B., Hórvölgyi Z.: Réz(I)-oxid tartalmú szol-gél bevonatok kialakítása és jellemzése, Proceedings of XLIII. Kémiai Előadói Napok (konferenciaközlemény), 2020
- [6] Demény P.: Cu- és Cu_2O -részecskékkel adalékolt mezopórusos TiO_2 -bevonatok előállítása és jellemzése (2022) BSc szakdolgozat
- [7] Gerszi A.: $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ fotokatalizátor rendszerek előállítása és jellemzése (2023) MSc diplomamunka
- [8] Demény P.: Cu- és Cu_2O -nanorészecskékkel adalékolt TiO_2 szol-gél bevonatok előállítása és fotoaktivitásuk vizsgálata (2023) Tudományos Diákköri dolgozat

- [9] Demény P., Tegze B., Madarász J., Sáfrán G., Zámbó D., Hórvölgyi Z.: Cu-tartalmú TiO₂-bevonatok fejlesztése és fotokatalitikus hatásuk intenzifikálása (előadás), XXIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Marosvásárhely, Románia, 2023
- [10] Hajmási V.: Fényáteresztést javító fotoaktív cink-oxid/szilika szol-gél bevonatok (2023) MSc diplomamunka
- [11] E. Albert, B. Tegze, Z. Hajnal, D. Zámbó, D. Szekrényes, A. Deák, Z. Hórvölgyi, N. Nagy; ACS Omega, 4.19 (2019): 18465-18471. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02990>; IF = 2,87; Q1;
- [12] Tegze B., Hórvölgyi Z., Nagy N.: Mezopórusos titán-dioxid bevonatok nedvesedésének jellemzése (poszter), XXVII. Nemzetközi Vegyészkonferencia, online, 2021
- [13] L. Kócs, B. Tegze, E. Albert, C. Major, A. Szalai, B. Fodor, P. Basa, G. Sáfrán, Z. Hórvölgyi, Vacuum, 192 (2021) 110415. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110415>; IF = 4,11; Q1;
- [14] L. Kócs, A. Késmárki, S. Klébert, J. Madarász, Z. Hórvölgyi; Thin Solid Films, 738 (2021): 138976. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138976>; IF = 2.183; Q2;
- [15] A. Ábrahám, L. Kócs, E. Albert, B. Tegze, B. Szolnoki, N. Nagy, G. Sáfrán, P. Basa, Z. Hórvölgyi, Thin Solid Films, 699 (2020) 137914. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137914>; IF = 2,183; Q2;
- [16] G. Szabó, E. Albert, J. Both, L. Kócs, G. Sáfrán, Á. Szőke, Z. Hórvölgyi, L. Mureşan; Surfaces and Interfaces, 15 (2019): 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.03.007>; IF = 3.724; Q1;
- [17] Bors A.: Fotokatalitikus tulajdonságú és fényáteresztést növelő mezopórusos titán-dioxid szol-gél bevonatok, BSc szakdolgozat, BME FKAT, 2022
- [18] Bors A., Márton P., Sándor B., Albert E., Hórvölgyi Z.: Fényáteresztést növelő, fotokatalitikus tulajdonságú, mezopórusos TiO₂-bevonatok előállítása szol-gél eljárással (poszter), Műszaki Kémiai Napok'23 konferencia, Veszprém, Magyarország, 2023
- [19] Albert E., Bors A., Madarász J., Márton P., Sáfrán G., Hórvölgyi Z.: Fényáteresztést növelő, fotoaktív TiO₂ szol-gél bevonatok (előadás), XXIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Marosvásárhely, Románia, 2023
- [20] P. Márton, Ö. Nagy, D. Kovács, B. Szolnoki, J. Madarász, N. Nagy, G. Szabó, Z. Hórvölgyi; International Journal of Biological Macromolecules, 232 (2023): 123336. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123336>; IF = 8.2; Q1
- [21] P. Márton, E. Albert, N. Nagy, B. Tegze, G. Szabó, Z. Hórvölgyi, Studia UBB Chemia, LXV, 3, (2020) 63-79. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2020.3.05>; IF = 0,447; Q4;
- [22] Á. Szőke, G. Szabó, Z. Simó, Z. Hórvölgyi, E. Albert, A. Végh, L. Zimányi, L. Muresan; European Polymer Journal, 118 (2019): 205-212; <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.05.057>; IF = 3.862; Q1;
- [23] Á. Szőke, G. Szabó, Z. Hórvölgyi, E. Albert, L. Gaina, L. Muresan; Carbohydrate Polymers, 215 (2019): 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.077>; IF = 7.182; Q1;
- [24] Á. Szőke, G. Szabó, Z. Hórvölgyi, E. Albert, A. Végh, L. Zimányi, L. Muresan, International Journal of Biological Macromolecules, 142 (2020): 423-431. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.114>; IF = 5.162; Q1;
- [25] B. Tegze, G. Tolnai, D. Hessz, M. Kubinyi, J. Madarász, G. Sáfrán, Z. Hórvölgyi, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 148, (2023) 10795–10802. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12417-5>; IF = 4.4; Q1
- [26] Borbás B., Tegze B., Hessz D., Kubinyi M., Hórvölgyi Z.: Fénymoduláló NaYF₄ : Yb, Er/Tm nanorészecskék kompozit bevonatai: a mátrixanyag hatása az emissziós fényintenzitásra (poszter), XXIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Marosvásárhely, Románia, 2023
- [27] Borbás B.: Fénymoduláló kolloidrézecskek szuszpenziói és kompozit rétegei: előállítás és jellemzés, (2021) Tudományos Diákköri dolgozat
- [28] Marton A.: Felkonvertáló nanorészecskék és TiO₂ tartalmú kompozit rendszereik előállítása és vizsgálata (2022) MSc diplomamunka
- [29] Borbás B., Tegze B., Hessz D., Kubinyi M., Madarász J., Hórvölgyi Z.: Felkonvertáló kolloid részecskék szuszpenziói és kompozit bevonatai: az anti-Stokes emisszió és az energiaátadási folyamatok vizsgálata (poszter), Műszaki Kémiai Napok'23, Veszprém, Magyarország, 2023
- [30] B. Tegze, E. Albert, B. Borbás, D. Hessz, M. Kubinyi, G. Tolnai, Z. Hórvölgyi: Upconversion properties of LaF₃:Yb,Er/Tm and NaYF₄:Yb,Er/Tm nanoparticles and their composite coatings (előadás), 20th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies, Thessaloniki, Görögország, 2023
- [31] Tegze B., Albert E., Hessz D., Kubinyi M., Tolnai G., Borbás B., Hórvölgyi Z.: Fénymoduláló kolloidrézecskek felkonvertáló emissziójának tanulmányozása szuszpenzióban és kompozit bevonatokban (előadás), XXIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Marosvásárhely, Románia, 2023