

Doktori értekezés tézisei

Önszerveződő hibrid nanofilmelek felépülése és morfológiai tulajdonságaik

Varga Viktória

Témavezető: Dr. Dékány Imre

egyetemi tanár, az MTA rendes tagja

Kémia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék

Szeged

2015

Bevezetés, célkitűzés

A kolloidkémiai rendszerek a tér legalább egyik irányában nanométeres kiterjedésűek, és változatos morfológiával rendelkeznek. A nanorészecskék vagy kvantumpontok (0D) kiterjedése mindhárom irányban nanoméretű, míg a szálak, a rudak és a csövek (1D) esetén az átmérő esik ebbe a tartományba. Az ultravékony-rétegek és bevonatok (2D) vastagsága szintén ebben a mérettartományban van. Az önszerveződő struktúrák (nanofilmek) hordozón való rögzítésére mindig nagy igényt támasztanak a gyakorlatban, hiszen így nagy felületű, mobilis eszközöket kapunk. Disszertációmban a legegyszerűbb, költségkímélő önrendeződéses rétegről rétegre történő filmépítési módot az ún. LbL (layer-by-layer) módszert választottam, hogy különböző – kolloid mérettartományba eső – méretű, és alakú részecskékből vékonyrétegeket állítsak elő, és ezek lehetséges alkalmazásait is vizsgáljam.

Az LbL módszer kiemelkedik a vékonyréteg technikák közül egyszerűségével, univerzalitásával, hatékonyságával. További előnye, hogy nincs nagy anyagigénye, ezért környezetkímélő módszernek mindősül. Az előállítás körülményeit – ionerősség, pH, merítési idő és ciklusszám, hőmérséklet, koncentráció – ellenőrzés alatt tartva a hibridek rétegvastagsága reprodukálható és gyakorlatilag tetszőlegesen hangolható. Az LbL rétegek egyik nagy csoportját képezik a makromolekulákból felépülő polielektrolit multirétegek (PEM), melyek felépülését, tulajdonságait a kutatók részletekbe menően tanulmányozták. Nanorészecskéket elsőként az 1990-es években alkalmaztak filmalkotó komponensként. Nagy potenciált jelentenek a funkcionális anyagok (festékek, fehérjék, DNS) kombinálása nanorészecskékkel vékonyrétegekben, a jövő szenzorai, elektronika-, mágneses eszközei elképzelhetetlenek az LbL vékonyréteg technológia nélkül. A „layer-by-layer” kulcsszót használó publikációk száma napjainkban sem csökken, évente több, mint 1200 cikk születik a témában. Mindezek ellenére a módszer elméleti hátterét tekintve számos kérdés nyitva van, mivel az önrendeződési technikával történő alkalmazás nem egyensúlyi folyamatot jelent. Számos irodalom elsősorban az alkalmazás oldalára koncentrál és a LbL hajtóerejét jelentő elektrosztatikus kölcsönhatásokkal és a másodlagos kötőerőkkel nem foglalkozik. Ezért közelítően kvantitatív tárgyalását szükséges bemutatni a rétegek felépülésére, morfológiájára.

A filmalkotó komponensek töltésviszonyainak tisztázása érdekében célul tűztem ki a nanorészecskék filmépítés szempontjából hozzáférhető töltésének meghatározását. Részecske töltés detektorban (PCD), ellentétes töltésű tenziddel titrálva terveztem meghatározni a filmalkotó komponensek fajlagos töltését és összevetni az elméleti (kémiai szerkezetből számolt, ill. ioncsere kapacitás) értékekkel. A filmalkotó komponensek töltésének a rétegek épülésben és morfológiában játszott szerepét szándékoztam tisztázni. A hordozón létrehozott

anyagok mennyiségével/töltésviszonyaival kapcsolatban pedig a fajlagos töltés- és koncentrációadatokból az építő elemekre jellemző paramétereket határoztam meg.

A rétegek felépülésének követésével, az abszorbancia vagy rétegvastagság – kettősrétegszám ($n\#$) függvényekből kiindulva egyrészt a görbékre illeszthető függvény típusa (lineáris vagy hatványfüggvény) alapján, másrészt a lineáris szakaszokra illesztett meredekség - filmépülési konstans (K_{LbL}) meghatározása révén a film épülés mechanizmusának feltárására törekedtem.

Céлом volt, hogy különböző kolloid részecskék és polielektrolitok alkalmazásával változó töltésállapotú nanohibrid rétegeket állítsak elő, amelyek szenzorok vagy reaktív felületek előállítására alkalmasak.

A lizozim-Au (LYZ/Au) ultravékony nanofilmekkel egy olyan bionanokonjugátumot hoztam létre, melyben hordozón rögzített formában vizsgálhatom a fehérje-nanorészecske kölcsönhatást. Elemeztem a fehérje szerepét a nanorészecske plazmonikus tulajdonságainak változásában, valamint a nanorészecske szerepét a fehérje konformációjának változásában. A LYZ/Au vékonyrétegek gőzszenzorként való lehetséges alkalmazását is vizsgáltam.

Az önszerveződő hibrid rétegek egyik fontos jellemző adata a rétegvastagság, melyet több módszerrel határoztam meg.

A vékonyrétegek felszínének nanoskálán történő tanulmányozásához atomi erő mikroszkópos (AFM) méréseket alkalmaztam, mely módszerrel egyrészt morfológiai, másrészt felületi érdesség adatokkal bővítettem a felületi szerkezeti jellemző adatokat. Az AFM módszert szándékoztam tesztelni a vékonyrétegek rétegvastagságának meghatározásában is.

Felhasznált anyagok

A 2:1 Mg-Al réteges kettős hidroxidok (LDH) előállításához NaOH-dal történő ún. koprecipitációs eljárást alkalmaztam, prekursoroként alumínium-nitrát (0,1 M) és magnézium-nitrátot (0,2 M) használtam. A szintézisnél nátrium-nitrátot (0,1 M) és nátrium-hidroxidot használtam (0,4 M).

Az LDH üveg hordozón való rögzítéséhez kötőanyagként polisztirol szulfát (PSS) polimert, szintetikus Na-hektoritot, valamint SiO_2 szolt használtam. A vékonyrétegek hordozójaként minden esetben tisztított Menzel Superfrost üveglemezt használtam.

A Berliini kék (BK) kolloidok szintéziséhez a $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ és $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ sókon kívül H_2O_2 oldatot használtam. A diszperzió stabilizáláshoz alkalmazott polimerek az alábbiak voltak: polivinil-alkohol (PVA), polivinil-pirrolidon (PVP), poli-allilamin-hidrogénklorid (PAH), poli-diallil-dimetil-ammónium-klorid (PDDA), polietilén-imin (PEI) és

PSS. A szenzoros mérésekhez interdigitális mikroszenzor elektródákat (IME) alkalmaztam, melyekre különböző módszerekkel építettem fel a nanohibrid rendszereket.

Az arany kolloidok (nanorészecskék) előállításához a kiindulási HAuCl_4 -oldat redukálására és stabilizálására Na-citrátot használtam.

Kísérleti módszerek

Az LDH szuszpenzió, Au és BK szolok részecskeméret- és elektrokinetikai (ζ -) potenciál meghatározását egy Malvern Zetasizer NanoZS típusú készülékkel végeztem, amely egy 632,8 nm hullámhosszúságú He-Ne lézer fényforrással működik. A ζ -potenciál méréseket egy U alakú kapilláris cellában végeztem.

A részecskék áramlási potenciálja vizes közegben egy ún. részecske töltés detektorban, a Mütek PCD02 típusú készülékben is meghatározható. A térfogatos titrálás módszerével analóg módon, egy ismert töltésmennyiségű és nagy tisztaságú anionos vagy kationos (pl. felületaktív) anyag segítségével határoztam meg az ismeretlen mennyiségű töltéshordozó kolloid részecske fajlagos töltését, az alábbi képlet szerint:

$$q_1 = \frac{V_2 \cdot 0.01 \cdot c_2 \cdot q_2}{c_1 \cdot V_1 \cdot M_1}$$

Az áramlási potenciál (Ψ) függ mindkét rendszer térfogatától (V), az egyik a készülékbe bemért, a másik a fogyás értékeként kapott térfogat. Az oldatok (szolok, szuszpenziók koncentrációja (c_1 mol/dm³-ben, míg c_2 m/V%-ban) és a tenzid moláris tömege (M) is szerepel az egyenletben és az ismert töltésmennyiségű anyag töltése (q) mmol/g-ban megadva. A változó felületi töltésű diszpergált részecskék és oldatok töltését a következő körülmények között határoztam meg: SiO_2 szol pH = 7,8, az AuNR diszperzió és a lizozim oldat pH-ja 6,2-es pH értékre állítottam be. A diszperziók hozzáadott só nem tartalmaztak, így minimalizálva az ionerősség hatását. A töltéstitrálások alapján az 1. Táblázatban bemutatott fajlagos töltés adatokat határoztam meg [1,2,6,7].

1. Táblázat: A különböző kolloidok fajlagos töltése

Anyag neve	fajlagos töltés (mmol/g)
PSS	-4,75
LDH	0,008
hektorit	-0,5
szilika szol	-0,3
Au	-0,015
lizozim	0,08
BK	-0,06
PAH	11,3

A nanofilmek, és az azt alkotó komponensek látható-UV fényabszorpciós tulajdonságainak meghatározására Uvikon 930-as típusú (Kontron Instruments) kétutas spektrofotométert használtam.

A nitrogén adszorpciós izotermák meghatározását, valamint a fajlagos felület számítását a Micromeritics cég Gemini 2375 típusú automata gázadszorpciós készülékével végeztük 77 K hőmérsékleten.

A termoanalitikai méréseket egyrészről egy Derivatograph Q-1500-D típusú műszerrel (MOM, Magyarország) valamint egy Mettler Toledo TGA/SDTA 851e típusú készülékkel végeztem.

A röntgendiffrakciós (XRD) méréseket egy Philips PW 1820-as generátorra rögzített goniométerrel végeztem, $\lambda = 0,154$ nm hullámhosszúságú $\text{CuK}\alpha$ sugárzás alkalmazásával (40 kV, 30 mA).

A fehérje konformációjának változását a LYZ/Au nanofilmekben egy Biorad FTS60A típusú ATR-el feltétellel felszerelt FT-IR készülékkel végeztem.

Az elektronmikroszkópos vizsgálatokat a 100 kV-os gyorsítófeszültségű Philips CM-10 típusú transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) végeztem az SZTE Általános Orvosi Karának Patológiai Intézetében.

A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételeket az SZTE Alkalmazott és Környezetkémiai Tanszékén a Hitachi S-4700 gyártmányú, hidegemissziós katóddal működő valamint egy FEI Helios Nanolab 600 Dualbeam (FIB-SEM) készülékkel készítettem. A mérések során másodlagos elektron detektort használtam.

Az elkészült filmeket morfológiai szempontból Atomi Erő Mikroszkóp (AFM) segítségével jellemeztem. Az AFM-képek Nanoscope III. típusú Digital Instruments (USA)

szkennerrel készültek. Az AFM-képek készítésére során egy Veeco Nanoprobe Tips RTESP típusú szilícium tűt használtam (125 μm tűhossz, 300 kHz frekvencia, 40 N/m rugóállandó). A felületi érdesség (RMS) adatokat a mikroszkópkezelő és kiértékelő V512r5 program segítségével határoztam meg az alábbi képlet alapján:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - Z_{\text{átl.}})^2}{N}},$$

ahol Z_i az i -edik pont magassága, $Z_{\text{átl.}}$ az átlagmagasság és N a mérhető pontok száma.

A szenzorként történő alkalmazás teszteléséhez interdigitális mikroszenzor elektródákat (IME) használtam, melyek elektromos vezetőképességét, illetve ellenállását Keithley 2400 Series Source Meter készülékkel vizsgáltam 0,1-2 V egyenáramú feszültség tartományban. A legkisebb detektálható koncentrációt (LOD) az alábbi egyenlet alapján határoztam meg:

$$x_{LOD} = 2x_C = \frac{2ts_y}{nt^2s_y^2 - Dr^2} \left(ts_y \sum x_i - \sqrt{\frac{D^2r^2}{k} + Dr^2 \sum x_i^2 - n \frac{D}{k} t^2 s_y^2 - Dt^2 s_y^2} \right)$$

ahol s_y a mért jel (áramerősség - mV) bizonytalansága x_i a koncentráció, x_C a bizonytalanságnál nagyobb koncentráció, t az egypróbas t -függvény, n a mérési pontok száma, D a determináns, r az érzékenység, k a párhuzamos mérések száma.

A vékonyrétegek épülése és gőzadszorpciós tulajdonságát kvarc kristály mikromérleg (QCM) segítségével követtem. QCM méréseimet egy Stanford Research System 200 típusú készülékkel végeztem, 5 MHz frekvenciájú kvarckristállyal, statikus rendszerben. A mért frekvenciaértékek és a kristályra adszorbeált tömeg közötti összefüggés a Sauerbrey-egyenlet adja meg,

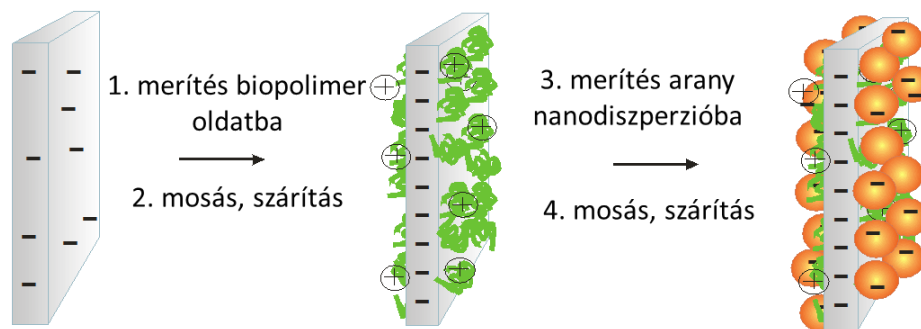
$$\Delta F = -C_f \cdot \Delta m,$$

ahol ΔF a tiszta, és a mérendő anyagra jellemző frekvenciaértékek különbsége, C_f a kristályra jellemző érzékenységi faktor, ami 56,6 Hz·cm²/mg szobahőmérsékleten, így az adszorbeált tömeget (Δm) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ -ben kapjuk meg.

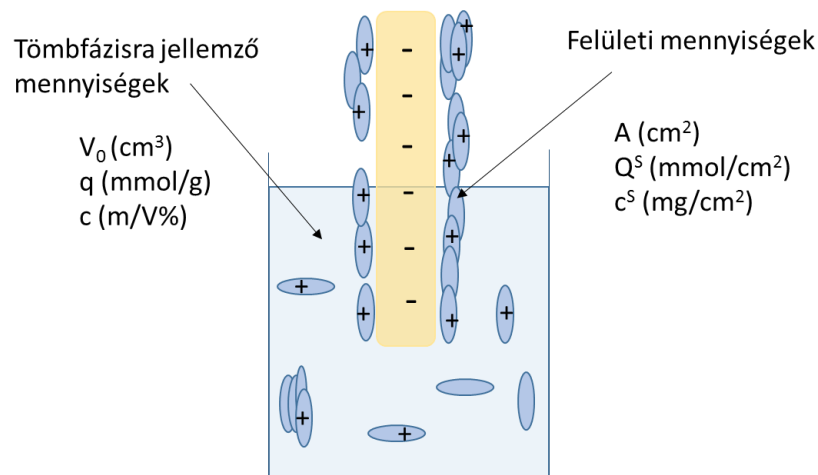
A felületi plazmon rezonancia spektroszkópos (SPR) méréseket a filmépülés követésére használtam egy Oriel-goniométerrel felszerelt házi készítésű készüléken arannyal borított üveg hordozón (SPRgoldTM hordozó, Gentel Biosciences).

Filmépítés LbL módszerrel

Az üveglemezt filmkészítés előtt tisztítottam, és szárítottam. Mivel az üveg felülete semleges és lúgos pH-n negatív töltésű, így azon pozitív töltésű részecskék a közöttük lévő elektrosztatikus kölcsönhatásnak köszönhetően vékony filmet képeznek. Így a felület kifelé ellenkező töltésűvé válik és a negatív részecskékkel a következő önrendeződő nanoréteg alakítható ki rajta. Az egyes bemerítési ciklusokat desztillált vizes mosás követett a nem elektrosztatikusan kötött komponensek eltávolítása céljából. Az LbL módszert a LYZ/Au nanofilm példáján bemutatva szemlélteti az alábbi ábra.



1.a ábra: Nanofilm készítés LbL módszerrel egy biopolimer/nanorészecske diszperzió kölcsönhatás formájában (1 kettősréteg)



1.b ábra: A tömbfázis térfogata (V_0), koncentrációja (c_0) és a töltéshordozó ekvivalens koncentrációja (q)

A vékonyrétegek fényelnyeléséből a homogén szuszpenzióra készített kalibráció alapján a nanohibrid réteg felületi koncentrációt (c^S - mg/cm^2) határoztam meg az abszorbancia értékekből. A felületi koncentráció és a sűrűség ismeretében a film közelítő vastagsága

számítható. A hordozón rögzített anyagok felületi koncentrációjának ismeretében számítottam az felületi anyagmennyiség/kiindulási anyagmennyiség (c_0 - m/V%) arányt ($w^S = m^S/m_0$), ami a rétegbe beépülő anyag mennyisége a teljes, rétegépítéshez felhasznált anyagmennyiséghez képest. A folyadékfázisban és a felületen jelen lévő töltések meghatározásához az alábbi egyenleteket használtam fel, valamint a mennyiségeket az 1.b ábrán is jelöltem. Az LDH összmennyisége (m_0 - mg), míg a felületi tömeget (m^S - mg) közelítőleg spektrofotometriás kalibráció, valamint pontosabban QCM/SEM mérések alapján számoltam, A a film felülete cm^2 -ben. Ebből a rétegbe beépülő tömegtört:

$$w^S = \frac{m^S}{m_0} = \frac{c^S \cdot A}{c_0 \cdot V_0}$$

A felületi töltés ekvivalens mennyiség mmol-ban meghatározott értéke a fajlagos töltések és a felületi mennyiségek alapján meghatározható:

$$Q_{mért}^S = m^S \cdot q = c^S \cdot A \cdot q$$

Ha a negatív töltésű komponensre a rétegben töltés kiegyenlítődést tételezünk fel, akkor: $Q_{PSS}^S = Q_{LDH}^S$. A komponensek térfogatának additivitását feltételezve egy rétegmodell (részecske átmérő, a polimer lánc geometriai adatai, lamella vastagság és a komponensek sűrűségének ismeretében) alapján számíthatók a $Q_{PSS/hektorit/SiO_2}$ értékek (mmol/cm^2). Monoréteges borítottságot feltételezve a rétegek vastagsága ($t_{PSS} = 0,42$ nm, $t_{hektorit} = 1$ nm, $t_{SiO_2} = 15,6$ nm) alapján: $Q_{elm}^S = t \cdot A \cdot \rho \cdot q$, amelyeket a kísérleti adatokkal vettem össze.

Új tudományos eredmények összefoglalása

T.1. A felületi töltés meghatározó szerepe a nanohibrid rendszerek önrendeződésében

1.a. Az önszerveződő nanorészecskék és polielektrolitok kölcsönhatását vizes közegű diszperz rendszerekben tanulmányozva igazoltam, hogy a különböző kémiai szerkezettel és morfológiával jellemezhető komponensek fajlagos töltése kvantitatív adatokat szolgáltat az önrendeződő rétegek építéséhez. A koncentrációarányok alkalmas megváltoztatásával – a fajlagos töltés-arányok ismeretében – változtatható a rétegek vastagsága és homogenitása. Az ún. immerziós bemeztetéses módszerrel létrehozott filmek vastagságát a bemeztetések számának és a komponensek fajtájának függvényében a 10-740 nm tartományban szabályoztam. A filmalkotó két komponens koncentrációjából és fajlagos töltéséből az alábbi egyenlet alapján $Q = m_1 \cdot q_1 / m_2 \cdot q_2$ számított töltésarányát széles tartományban változtattam, ahol $Q_{PSS} / Q_{LDH} = 300-$

500, $Q_{\text{hektorit}}/Q_{\text{LDH}} = 15-65$ és $Q_{\text{SiO}_2}/Q_{\text{LDH}} = 10-40$. A mikroszkópos módszerekkel kapott képek révén megfigyeltem, hogy homogén kettőshidroxid rétegek keletkezéséhez legalább 50-szeres kötőanyag felesleg kell. A SiO_2 szol esetében ezért nem kaptam összefüggő rétegeket, mert a SiO_2 mennyisége (0,25; 0,5 és 1 %) nem elegendő a megfelelő töltésfelesleg kialakításához [2,6,7]. Az ily módon kapott rétegvastagság értékeket összevetettem más módszerekkel (QCM, SEM, AFM) alapján kapott eredményekkel. Az abszorbancia-mérésekből meghatározott értékek a valós rétegvastagság értékeket (AFM, SEM) ~20 %-al meghaladják, mivel nem veszi figyelembe a filmek porozitását, ezért a felületinél nagyobb ρ és ezáltal t értékeket ad.

1.b. A kettős hidroxid filmek esetében a komponensek kiindulási koncentrációjától függően 0,03-0,6 % LDH épül be a rétegekbe, ha negatív töltésű PSS-t vagy hektoritot, vagy SiO_2 szolt alkalmazunk az ellentétes töltésű a rétegekben. A becsült mennyiségek alapján megállapítottam, hogy LDH/PSS rétegekre a töltés ekvivalencia alapján következtetett ($Q^S_{\text{mért}}$) és a monoréteges borítottság alapján geometriai szempontok alapján számolt elméleti értékek jól egyeznek, a számolt érték alapján a PSS áttölti az LDH réteget. A hektoritot vagy SiO_2 -ot tartalmazó LDH-filmek esetében a rétegmodell alapján számolt értékek nagyságrendekkel kisebbek, mint a mért adatok, tehát az elméletihez képest számottevően kisebb mennyiség épül be a rétegekbe, a borítottság a monomolekulásnál kisebb.

T.2. A különböző komponenssel (polielektrolit vagy részecske) készített kettős hidroxid nanohibrid rétegek tulajdonságai

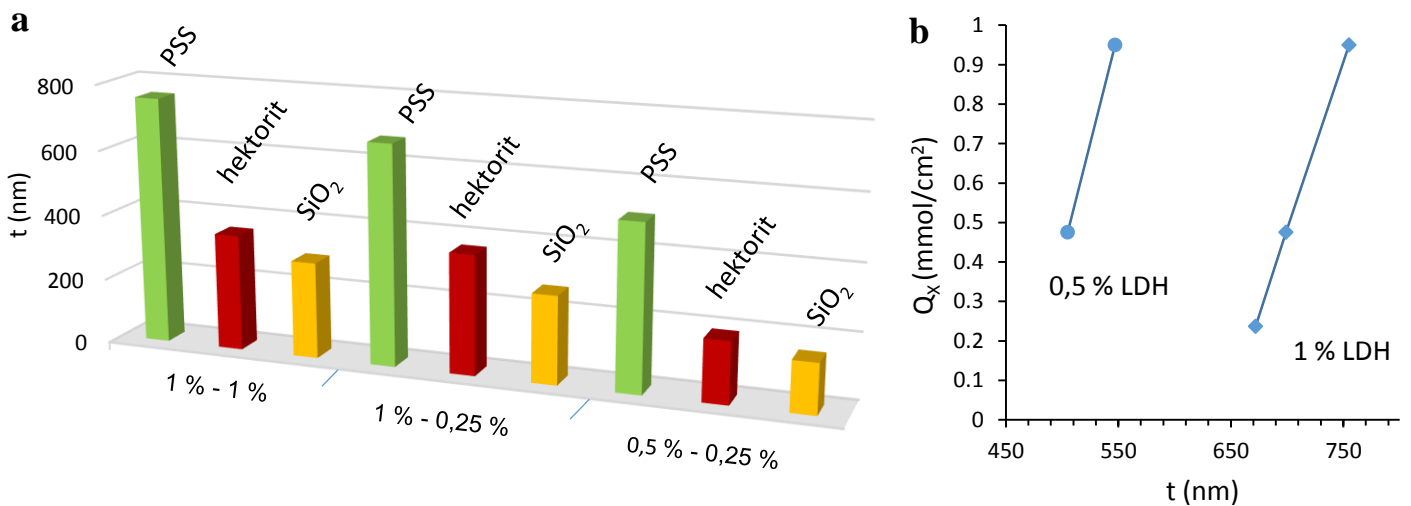
A rétegvastagság meghatározási eredményekből kitűnik, hogy a polimerrel készített hibridek sokkal vastagabbak (~500-740 nm), mint a hektorittal, vagy SiO_2 -dal készített rétegekre kapott 60-180 nm értékek [1,2]. A PSS egy nagyságrenddel nagyobb fajlagos töltésével és a polimer lánc flexibilitásával és a felületi hurkok jelenlétével magyarázható a filmek vastagságában is megjelenő egy nagyságrend különbség. A hektorit és SiO_2 vékonyrétegek esetében viszont a másodlagos kötőerők szerepe a meghatározó. A deszt. vizes mosás után ugyanis egy laza elektrosztatikus kettősréteg képződik a hordozón. A vékonyréteg önszerveződés mechanizmusának megismeréséhez a rétegszám függvények alakját vizsgálva a következő megállapításokat tehettem.

i.) Az LDH-PSS filmek esetében alkalmazott töltésfelesleg erős kettős hidroxid-poliion komplex képződését eredményezi nagy töltéssűrűségnél, ami vastag, stabil és a rétegszámmal lineárisan épülő rétegeket eredményez.

ii.) A merítési idő növelése 10 percről 1 órára, nincs hatással a képződő rétegek vastagságra, mivel az elektrosztatikus adszorpciós folyamat rövid idő (10 perc) alatt lejár, ezután a borítottság tovább nem növelhető.

iii.) Az LDH-hektorit hibrid vékonyrétegek épülése az első néhány réteg kiépülése után ($n = 4$) lineárisról exponenciálisra változik ($\ln y = 0,19x - 4,27$ az 1 m/V% LDH – 0,5 m/V% hektorit filmre), mivel a szigetszerű kezdeti épülés miatt megnövekszik a film felülete, ami eleinte nagyobb anyagmennyiség megkötődését eredményezi.

iv.) Az LDH/PSS vékonyrétegek rétegvastagságát elsősorban az LDH kiindulási koncentrációja határozza meg, másodsorban a Q_{PSS}/Q_{LDH} töltésarány, melynek csökkenésével lineárisan csökken a filmek rétegvastagsága.



2.a,b ábra: A különböző kötőanyagokkal és kiindulási koncentrációkkal (m/V%) épült LDH filmek rétegvastagságára vonatkozó eredmények és (a) a PSS filmek rétegvastagságának változása a felületi töltéssel (b)

v.) A SiO₂ filmek esetében a rétegvastagság másodfokú függvény szerint nő a rétegszámmal, amit feltehetően a gömb alakú részecskéken való héj-szerű borítás (a gömbfelszín-sugár négyzetes összefüggése: $lgA \propto 2lgD \cdot \pi \cdot n^{\#}$, ahol D a héj vastagsága) indokol.

T.3. A berlini kék diszperziók *in situ* sztérikus stabilizálása, a polimer mennyiségének hatása a részecskeméretre

3.a. Stabilizálószer nélkül a Fe^{3+} ion és $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ reakciójában H_2O_2 jelenlétében ($c_{\text{Fe}^{2+}}, c_{\text{Fe}^{3+}} = 10 \text{ mM}$, $c_{\text{H}_2\text{O}_2} = 5 \text{ mM}$) ülepedő, ~180 nm-es részecskéket állítottam elő. Különböző polielektrolit, PAH ($d = 42 \text{ nm}$), PDDA ($d = 34 \text{ nm}$), PSS ($d = 4 \text{ nm}$), PVP ($d = 39 \text{ nm}$) és PVA ($d = 16 \text{ nm}$) hozzáadásával csökkentettem a részecskeméretet és növeltem a szol stabilitást, hogy a további, szenzorként való alkalmazásra megfelelően nagy fajlagos felületű részecskéket, nagyobb adszorpciós kapacitású BK szolokat kapjak. Így a polimer fajtájától és mennyiségétől függően különböző átmérőjű – TEM mérésekkel ellenőrzött – ($d_{\text{átl.}} = 4\text{-}40 \text{ nm}$) részecskéket állítottam elő.

3. b. A PVP-vel stabilizált szol esetében a monomer/ Fe^{2+} arányának növelésével (0-100 között), közel exponenciálisan – az $\ln y = 0,013d + 3,96$ egyenlet szerint – csökkent a keletkező $\text{K}_2\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ részecskék mérete, 182 nm-ről 18 nm-re. A részecskeméret-csökkenéssel párhuzamosan növekszik a szol kolloid stabilitására jellemző ζ -potenciál abszolút értéke -38 mV-ról -68 mV-ra [3]. Az észlelt változásokat azzal magyaráztam, hogy a precipitáció során képződő részecskék méretét meghatározó folyamatok – a göcképződés és a göcnövekedés - közül a polimer jelenlétében a göcnövekedés sebessége csökken, ezáltal kisebb részecskék keletkeznek, melyeket a felületen megkötődő polimer láncok sztérikusan stabilizálnak. A keletkezett kis méretű részecskék esetében a TEM felvételek alapján meghatározott részecskeméretből számolt fajlagos felület ($a^S = 6000/\rho \cdot d$) $98 \text{ m}^2/\text{g}$ (10:1 aránynál, ahol a polimer mennyisége 3,62 g polimer/g részecske).

T.4. A BK vékonyrétegek szenzorként való alkalmazása

A 20:1 PVP-BK részecske 0,25 m/V%-os PAH polimerrel rögzített LbL kettősrétege ITE elektródákon hatékony szenzornak bizonyult H_2O_2 , ecetsav és HCl gőzének érzékelésében. A BK-módosított elektródák redox rendszerekben a $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ elektronátmenetnek köszönhetően vezetnek, másrészt pH érzékenyek, ezért alkalmazhatóak savgőzök érzékelésében. A $0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ felületi borítottságú PAH/BK szenzor, különböző koncentrációjú gőzökre (5-50000 ppm tartományban) adott áramerősség jel válaszait mértem – 0,1-2 V egyenfeszültség alkalmazása mellett –, így olyan szenzogramokat kaptam, melyek minden esetben telítési jelleget mutattak a 10-10000 ppm koncentrációjú oldatok gőzére [3]. Az ellenállás értékek nagyságrendje vezető tulajdonságú filmet mutat. A kis koncentrációtartományra, azaz az áramerősség–c profilok kezdeti lineáris szakaszára meghatározott kalibrációs egyenes pontjainak a lineáristól való eltéréséből számítottam a legkisebb érzékelhető koncentráció

(LOD) értékeket, melyek a PAH/BK hibrid film szenzorral H₂O₂-ra LOD = 20 ppm, míg ecetsavra LOD = 22 ppm értékek adódtak.

T.5. A lizozim/Au nanohibrid rétegek képződése

A Na-citráttal stabilizált Au szol (pH = 6,2) negatív felületi töltésű [5] és a lizozim fehérje ezen a pH-n pozitív töltésű (iep: pH = 9,3), ezért LbL nanohibrid film építésére alkalmas [6]. Az elektrosztatikus vonzáson túlmenően a lizozim fehérjében lévő cisztein aminosavak tiol funkciós csoportjai is hozzájárulhatnak az önszerveződő szerkezet képződéséhez. Megállapítottam, hogy a 30-120 nm-es ultravékony filmek vastagsága lineárisan nő a bemelegítési rétegszámmal, vagyis a kigombolyodott fehérje töltését az AuNR kompenzálni tudja. Megállapítottam, hogy a bemelegítési idő 10 percről 60 percre történő növelésével a rétegvastagság 3-szorosára nő. A meghatározott rétegvastagság abszorbancia és AFM vizsgálatok alapján is ~ 120 nm egy n = 30 kettősrétegű LYZ/Au nanofilm esetében, ami átlagosan 3,1 nm vastagságú Au rétegből és egy 0,8 nm vastagságú lizozim rétegből áll ($K_{LbL} = \Delta t/n = 3,9 - \text{nm}/n\#$). Az egy-egy rétegre kapott t értékek alapján nem alakul ki egy teljes Au réteg, a filmépülési konstans értéke kisebb, mint a részecske ill., a fehérjegombolyag átmérője. A LYZ réteg vastagsága átlagosan kisebb, mintha két réteg szénlánc alakulna ki egy merítési ciklussal a felületen, másrészt a fehérjelánc funkciós csoportjainak – egy alkilánccnál – nagyobb helyigénye miatt. Tehát a fehérje konformációja a kigombolyodás miatt a LYZ/Au kettősrétegekben megváltozik az oldatfázisúhoz képest.

T.6. A lizozim/Au nanohibrid rétegek plazmonikus tulajdonságai

Az eredetileg borvörös színű aranyzol (0,02 m/V%) színe a LYZ/Au rétegekben kékre változott, melyet az arany-lizozim kölcsönhatás miatti aggregációval magyaráztam [5]. Az aggregációt a LYZ/Au folyadékfázisú kísérlete is bizonyítja, mivel a kiindulási szolra jellemző λ_{max} érték 530 nm-ről 620 nm-re változik. Megjelenik egy új, 765 nm-es maximummal rendelkező csúcs, ami aggregált anizomertikus AuNR-ék jelenlétét igazolja LYZ: Au = 1:20 aránynál. A TEM képeken is megfigyelhető a részecskék egymáshoz való kapcsolódása. Az $n \geq 5$ kettősréteg kialakulása után az Au fémes jellege is előtűnik, a ráeső fényben megjelenő aranyos szín és tükröző felület formájában, ami a rétegek növekvő homogenitására utal [6]. A rétegszám növekedésével, 20 kettősrétegtől, 74 nm rétegvastagságtól kezdődően az AuNR-ék összefüggő réteget alkotnak, ezáltal jól reflektáló aranytükör képződik az üveglap felszínén. Az

AFM-el meghatározott felületi érdesség adatok is a film felületének homogénebbé változását igazolják, az $n = 30$ kettősrétegszámú film érdessége $31,3$ nm, szemben a 10 kettősrétegű filmre kapott $RMS = 56$ nm-es értékkel.

T.7. A lizozim/Au nanohibrid rétegek vastagsága és porozitása

A LYZ/Au nanohibrid rétegek vastagságát SEM és AFM mérésekkel a rétegek keresztmetszeti képéből, a megkarcolt/eltört film keresztmetszeti profiljából meghatározva a következőket állapítottam meg. Az AFM mérésből meghatározott rétegvastagság értékeket összevetve a 400 nm hullámhosszúnál leolvasott abszorbancia értékből számolttal, így maximum ± 7 % eltéréssel jó egyezést kaptam. Az AFM és QCM módszerekkel számított rétegvastagságok közötti $10-50$ % eltérést megmagyarázza a film szerkezetben lévő pórusok jelenléte. A QCM módszer csak a réteg tömegét tudja mérni, míg az AFM a valós, pórusos szerkezetet képezi le, amelyből keresztmetszeti szerkezet adható meg. Feltételezve a QCM mérésből számolt rétegvastagságnál a tömbi fázist, a két módszer összevetéseként a számolható porozitás (ε) értéke:

$$\varepsilon = \frac{V_t - V_{QCM}}{V_t} = \frac{t_{AFM} - t_{QCM}}{t_{AFM}}$$

A fenti képlet alapján kiszámítottam az LYZ/Au nanofilmek porozitását is, egy $n = 30$ LYZ/Au kettősréteget tartalmazó filmre adott értéke $0,4$, azaz 40 % [6].

T.8. Az LbL vékonyrétegek jellemzése AFM-mel

Az AFM méréseket a szakirodalomban elterjedt morfológiai jellemzésen túl, a keresztmetszeti profil analízist rétegvastagság-meghatározásra, és az érdesség adatokat a filmépülés mechanizmusának felderítésére is alkalmaztam. Az LDH filmek közül a LDH/PSS rétegek mutattak a leghomogénebb felületet, az 1 m/V% LDH - $0,5$ m/V% PSS film esetében $RMS = 125$ nm érdességgel. A PSS mennyiségének csökkentésével (1 m/V% - $0,25$ m/V%), az érdesség 250 nm-re növekszik, ami összhangban van az optimális 50 -szereshez (lásd T.1.) képest kisebb töltésarányal ($Q_{SiO_2}/Q_{LDH} = 40$). A kettős hidroxid filmeknél hektorit, illetve SiO_2 kötőanyag alkalmazásával az előbbinél látható a hektoritra jellemző lamellás szerkezet, míg a SiO_2 filmeknél AFM alapján bizonyítottam a SiO_2 gömbök és a lamella-csomagok elkülönült, szigetszerű megjelenését ($RMS = 150, 165$ nm).

A $0,5$ m/V% LDH - $0,25$ m/V% PSS-ből felépített hibrid film ($n = 10$) AFM felvétele alapján megállapítható, hogy a polielektrolit lefedi a lamellákat, és ezáltal egységesebb filmet hoz létre

(érdesség = 140 nm), szemben az 1 m/V% LDH filmekkel, ahol a kettős hidroxid lamellák összetapadását a kisebb polimer koncentráció (0,25-0,5 m/V%) nem tudja megakadályozni, ezért $h = 400-500$ nm magasságú lamella csomagok képződnek [1,4].

A PAH/PB ($n = 10$) és a LYZ/Au ($n = 30$) hibrid rétegek viszonylag homogének, simák, RMS = 24, 31 nm érdességgel. Felületükön a részecskékre jellemző gömb alakú szerkezet figyelhető meg, a PAH és a LYZ is sztérikusan stabilizálja, vékony rétegben bevonja az arany nanorészecskéket, a filmépülés linearitása az filmalkotó komponensek közötti töltéskompensációt igazolja.

T.9. A lizozim/Au filmek lehetséges gőzadszorpciós szenzorikai alkalmazása

Az $n = 30$ kettősréteget tartalmazó LYZ/Au vékonyréteget különböző polaritású és funkció csoportokkal rendelkező gőzök érzékelésében elsőként teszteltem QCM segítségével, statikus rendszerben. A QCM-mel mért adszorbeált tömeg értékekből ($\Delta m - \mu\text{g}/\text{cm}^2$) – az adszorptívum molekulák moláris tömegének (M) és moláris felületigényének ($a_m - \text{nm}^2/\text{mol}$) ismeretében - borítottság adatokat határoztam meg:

$$\theta = \frac{\Delta m}{M} \cdot a_m$$

A borítottság értékek az alábbi sorrendben növekedtek: toluol, etanol, víz, ecetsav, ammónia. A film poláris jellege miatt toluolra kis adszorpciós kapacitást mértem, míg etanolra, vízre és ecetsavra közel azonos, a monomolekulás borítottságot 20-45 %-al meghaladó (1,22; 1,32, 1,45) értékeket kaptam. Az NH_3 -ra számított adszorpciós mennyiség közel egy nagyságrenddel meghaladja a monomolekulás borítottságnak (7,72-szeres) megfelelő értéket [6]. A monomolekulás borítottságot meghaladó értékek a film pórusos szerkezetével magyarázhatóak, az ammónia esetében pedig a többi gőzzel szembeni nagyobb telített gőznyomás értéke. A telített gőznyomással korrigált adszorbeált mennyiség (θ/p_0) értékekben már nem emelkedik ki az ammónia, hanem vízgőzre kaptam a legnagyobb értéket, melyet rendre az ecetsavra, ammóniára, etanolra és toluolra számolt értékek követnek.

Az értekezés témájában megjelent tudományos dolgozatok

[1] V. Hornok, A. Erdőhelyi, I. Dékány:

Preparation of ultrathin membranes by layer-by-layer deposition of layered double hydroxide (LDH) and polystyrene sulfonate (PSS).

Colloid and Polymer Sci. 283, 1050-1055 (2005)

impakt faktor: **1,263**, hivatkozások száma: **31**

[2] V. Hornok, A. Erdőhelyi, I. Dékány:

Preparation of ultrathin membranes by layer-by-layer (LBL) deposition of oppositely charged inorganic colloids

Colloid and Polymer Sci. 284, 611-619 (2006)

I.F.: **1,249**, hivatkozások száma: **18**

[3] V. Hornok, I. Dékány:

Synthesis and stabilization of Prussian blue nanoparticles and application for sensors.

Journal of Colloid and Interface Sci. 309 (1), 176-182 (2007)

I.F.: **2,309**, hivatkozások száma: **32**

[4]T. Aradi, V. Hornok, I. Dékány:

Layered double hydroxides for ultrathin hybrid film preparation using layer-by-layer and spin-coating methods

Colloids and Surfaces A 319 (1-3), 116-121 (2008)

I.F.: **1,926**, hivatkozások száma: **18**

[5] A. Majzik, R. Patakfalvi, V. Hornok, I. Dékány:

Growing and Stability of Gold Nanoparticles and their Functionalization by Cysteine

Gold Bulletin 42 (2009) 113-123

I.F.: **2,324**, hivatkozások száma: **27**

[6] E. Pál, V. Hornok, D. Sebők, A. Majzik, I. Dékány:

Optical and structural properties of protein/gold hybrid bio-nanofilms prepared by layer-by-layer method

Colloid and Surfaces B 79 (2010) 276-283

I.F.: **2,780**, hivatkozások száma: **8**

[7] T. Bujdosó, V. Hornok, I. Dékány:

Thin films of layered double hydroxide and silver and silver-doped polystyrene particles

Applied Clay Science 51 (3) (2011) 241-249

I.F.: **2,303**, hivatkozások száma: **1**

$$\sum_{i=1-7} I.F. = 14,154$$

Egyéb, az értekezés témájához szorosan nem kapcsolódó tudományos dolgozatok

8. Á. Patzkó, R. Kun, V. Hornok, I. Dékány, T. Engelhardt, N. Schall:

ZnAl-layer double hydroxides as photocatalysts for oxidation of phenol in aqueous solution
Colloids and Surfaces A 265, 64-72 (2005)

I.F.: **1,499**, hivatkozások száma: **51**

9. E. Pál, D. Sebők, V. Hornok, I. Dékány:

Structural, optical and adsorption properties of ZnO₂/poly(acrylic acid) hybrid thin porous films prepared by ionic strength controlled layer-by-layer method

Journal of Colloid and Interface Science 332 (2009) 173-182

I.F.: **3,019**, hivatkozások száma: **19**

10. E. Pál, V. Hornok, A. Oszkó, I. Dékány:

Hydrothermal synthesis of prism-like and flower-like ZnO and indium-doped ZnO structures

Colloids and Surfaces A 340 (2009) 1-9

I.F.: **2,780**, hivatkozások száma: **46**

11. T. Szabó, V. Hornok, RA. Schoonheydt, I. Dékány :

Hybrid Langmuir-Blodgett monolayers of graphite oxide nanosheets

Carbon 58 (2010) 1676-1680

IF: **4,893**, hivatkozások száma: **18**

12. V. Hornok, T. Bujdosó, J. Toldi, K. Nagy, I. Demeter, C. Fazakas, I. Krizbai, L. Vécsei, I. Dékány:

Preparation and properties of nanoscale containers for biomedical application in drug delivery: preliminary studies with kynurenic acid

Journal of Neural Transmission 119 (2011) 115-121

I.F.: **2,597**, hivatkozások száma: **4**

13. E. Csapó, R. Patakfalvi, V. Hornok, L.T. Tóth, Á. Sipos, A. Szalai, M. Csete, I. Dékány:
Effect of pH on stability and plasmonic properties of cysteine-functionalized silver nanoparticle dispersion

Colloids and Surfaces B 98 (2012) 43-49

I.F.: **3,456**, hivatkozások száma: **28**

14. G. Bohus, V. Hornok, A. Oszkó, A. Vértes, E. Kuzmann, I. Dékány:

Structural and luminescence properties of Y₂O₃:Eu³⁺ core-shell nanoparticles

Colloids and Surfaces A 405 (2012) 6-13

I.F.: **2,236**, hivatkozások száma: **4**

15. E. Pál, V. Hornok, R. Kun, V. Chernyshev, T. Seemann, I. Dékány, M. Busse:

Growth of raspberry-, prism- and flower-like ZnO particles using template-free low-temperature hydrothermal method and their application as humidity sensors

Journal of Nanoparticle Research 14 (2012) 14

I.F.: **3,287**

16. K. Lázár, T. Belgya, E. Csapó, I. Dékány, V. Hornok, S. Stichleutner:

In-beam Mössbauer-spektroszkópia

Nukleon 120 (2012) 7-11

17. E. Pál, V. Hornok, R. Kun, A. Oszkó, T. Seemann, I. Dékány, M. Busse:

Hydrothermal synthesis and humidity sensing property of ZnO nanostructures and ZnO-In(OH)₃ nanocomposites

Journal of Colloid and Interface Science 378 (2012) 100-109

I.F.: **3,07**, hivatkozások száma: **4**

18. L. Kőrösi, S. Papp, V. Hornok, A. Oszkó, P. Petrik, D. Patkó, R. Horváth, I. Dékány: Titanate nanotube thin films with enhanced thermal stability and high-transparency prepared from additive-free sols

Journal of Solid State Chemistry 192 (2012) 342-350

I.F.: **2,159**, hivatkozások száma: **8**

19. A.M. Youssef, T. Bujdosó, V. Hornok, S. Papp, A.E.A. Hakim, I. Dékány: Structural and thermal properties of polystyrene nanocomposites containing hydrophilic and hydrophobic layered double hydroxides

Applied Clay Science 77-78 (2013) 46-51

I.F.: **2,342**, hivatkozások száma: **3**

20. A. Majzik, V. Hornok, D. Sebők, T. Bartók, L. Sente, K. Tuza, I. Dékány: Sensitive detection of Aflatoxin B1 molecules on gold SPR chip surface using functionalized gold nanoparticles

Cereal Research Communication 43 (2015) 426-437

I.F.₂₀₁₄: **0,624**

21. A. Majzik, V. Hornok, N. Varga, R. Tabajdi, I. Dékány: Functionalized gold nanoparticles for 2-naphthol binding and their fluorescence properties

Colloids and Surfaces A 481 (2015) 244-251

I.F.₂₀₁₄: **2,752**

$$\sum_{i=1-21} I.F. = 48,868$$

Konferencia részvételek

előadások

1. Hornok Viktória, Szekeres Márta, Erdőhelyi András, Dékány Imre: Ultravékony rétegek előállítás, szerkezete és felületi morfológiájának vizsgálata AFM technikával

4. Magyar SPM Találkozó, SZAB székház, Szeged, 2006. április 21.

2. Hornok Viktória:

Az atomi erő mikroszkóp kolloidkémiai alkalmazásai

Az élőlényektől az atomokig, vizsgálatok pásztázó mikroszkópokkal

MTA-SZAB Kémiai szakbizottság, Anyagtudományi Munkabizottság, Magyar Tudomány Ünnepe, SZAB székház, Szeged, 2007. november 8.

3. Hornok Viktória, Benkő Mária, Dékány Imre:

Dynamic light scattering for the determination of particle size distribution and z-potential of nanoparticles. Special applications in the 2-20 nm range with Horiba SZ-100

Francelab tudományos napok, Budapesti Francia Intézet, Budapest, 2014. február 25-27.

4. Varga Viktória:

Réteges felépítésű önszerveződő hibrid nanofilmek, szerkezetük és tulajdonságaik
SZAB Kémiai Szakbizottság Anyagtudományi Munkabizottsága „Anyagtudományi
Kutatások Szegeden” rendezvénysorozat, SZAB Székház, Szeged, 2014. május 13.

5. Hornok Viktória:

Önszerveződő hibrid nanofilmek szerkezete és morfológiai tulajdonságaik – PhD munka
bemutatása
SZAB Kémiai Szakbizottság Anyagtudományi Munkabizottsága, MTA SZAB székház,
Szeged, 2014. október 20.

6. Hornok Viktória, Csapó Edit, Varga Noémi, Juhász Ádám, Sebők Dániel, Dékány Imre:
Nanokapszulás kompozit rendszerek tervezése: szerkezeti és termodinamikai összefüggések
Kinurenin Kerekasztal, SZAB székház, Szeged, 2015. május 21.

poszterek

1. J. Ménesi, V. Hornok, A. Erdőhelyi, I. Dékány:

Self-assembled layered double hydroxide/polymer composites for gas separation
8th International Symposium on Interdisciplinary Regional Research (ISIR)
2005. április 19-21., Szeged, Magyarország

2. T. Szabó, I. Konfár, J. Ménesi, V. Hornok, I. Dékány:

Structure and electronic properties of graphite oxide and its polymer composite
European Materials Research Society (E-MRS) Spring Meeting
2005. május 31 – június 3., Strasbourg, Franciaország

3. J. Ménesi, V. Hornok, A. Erdőhelyi, I. Dékány:

Self-assembled layered double hydroxide/polymer composites and polymer nanofilms: the
effect of salt concentration on the film thickness
E-MRS Spring Meeting, 2005. május 31 – június 3., Strasbourg, Franciaország

4. V. Hornok, É. Sija, I. Dékány:

Synthesis and stabilization of Prussian blue nanoparticles and application for sensors
20th Conference of the European Colloid and Interface Society, 18th European Chemistry at
Interfaces Conference (ECIS-ECIC),
2006. szeptember 17-22., Budapest, Magyarország

5. T. Aradi, V. Hornok, I. Dékány:

Layered double hydroxides for ultrathin film preparation using layer-by-layer and spin
coating methods
20.ECIS, 18.ECIC, 2006. szeptember 17-22., Budapest, Magyarország

6. E. Pál, V. Hornok, I. Dékány:

Investigation of fluorescent CdS, ZnO, and doped ZnO nanolayers prepared by LbL
immersion method
20.ECIS, 18.ECIC, 2006. szeptember 17-22., Budapest, Magyarország

7. A. Majzik, R. Patakfalvi, V. Hornok, I. Dékány:

Gold nanoparticle growing and stability, their functionalization by cysteine

23. ECIS, 2009. szeptember 6-11., Antalya, Törökország

8. T. Szabó, R. Schoonheydt, V. Hornok, I. Dékány:

Preparation of ordered graphene nanolayers by Langmuir-Blodgett deposition of exfoliated graphite oxide

23. ECIS, 2009. szeptember 6-11., Antalya, Törökország

9. V. Hornok, I. Dékány:

Preparation and characterization of lysozyme nanofilms prepared by LbL method

23. ECIS, 2009. szeptember 6-11., Antalya, Törökország

10. E. Csapó, A. Majzik, V. Hornok, Sz. Papp, N. Fejős, L. Fülöp, B. Penke, I. Dékány:
Characterization of amino acid- and peptide-conjugated gold and silver nanoparticles

24. ECIS, 2010. szeptember 5-10., Prága, Csehország

11. E. Csapó, V. Hornok, Á. Juhász, M. Csete, I. Dékány:

Characterization of amino acid- and peptide conjugated gold and silver nanoparticles

Euronanoforum 2011. május 30 – június 1, Budapest, Magyarország

12. Á. Sipos, A. Szalai, E. Csapó, R. Patakfalvi, V. Hornok, M. Csete, I. Dékány:

Numerical investigation of the plasmonic properties of bare and cysteine-functionalized silver nanoparticles aggregates

Euronanoforum 2011. május 30 – június 1., Budapest, Magyarország

13. E. Csapó, V. Hornok, A. Sipos, A. Szalai, M. Csete, D. Sebők, I. Dékány:

Plasmonic properties of biofunctionalized gold/silver nanoparticles at different pH in aqueous dispersion

Biological Surfaces and Interfaces

2011. június 26 – július 1., SantFeliu de Guixols, Spanyolország

14. V. Hornok, T. Bujdosó, T. Rica, A.A. AbdEl-Hakim, A.M. Youssef, O.R.A. Soliman, I. Dékány:

Stabilization of polymer hybrid nanocomposites using functionalized Zn-Al layer double hydroxides

16th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC),

2011. május 22-27., Seč-Ústupy, Csehország

15. T. Szabó, V. Hornok, I. Dékány:

Hybrid Langmuir monolayers of graphene oxide nanosheets/octadecyl-Rhodamine B and their derived graphene Films

Carbon, 2011. július 24-29., Shanghai, Kína,

16. E. Pál, V. Hornok, R. Kun, T. Seemann, I. Dékány and M. Busse:

Raspberry-, and prism-like ZnO nanoparticles and ZnO-In(OH)₃ nanocomposites prepared by hydrothermal method

25. ECIS, 2011. szeptember 2-9., Berlin, Németország

17. E. Csapó, V. Hornok, D. Sebok, G. Bohus, S. Papp and I. Dékány:

Characterization of biofunctionalized noble metal nanoparticles for biomedical and sensor

applications

25. ECIS, 2011. szeptember 2-9., Berlin, Németország

18. E. Pál, V. Hornok, R. Kun, A. Oszkó, I. Dékány. M. Busse:

Hydrothermal synthesis and humidity sensing property of ZnO nanostructures, ZnO-In(OH)₃ and ZnO-In₂O₃ nanocomposites

5th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN)

2012. október 24-27., Szeged, Magyarország

19. E. Kuzmann, A. Vértes, G. Bohus, V. Hornok, A. Oszkó, I. Dékány:

¹⁵¹Eu Mössbauer study of luminescent Y₂O₃:Eu³⁺ core-shell nanoparticles

International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME)

2012. szeptember 1-7., Dalian, Kína

Szabadalom

Ábrahám Imre, Aradi Tamás, Hornok Viktória, Gingl Zoltán, Dékány Imre

Elektrosztatikus töltéskompensációs detektor és mérőegység kifejlesztése nanorészecskék és szupramolekuláris rendszerek elektrosztatikus töltésének meghatározására.

Szabadalmi szám: HU200900422-A1

Bejelentő: Szegedi Tudományegyetem, Unichem Kft. 2007

Megjelent dolgozatok száma: 21

Összesített hatástényező: 48,868

Független hivatkozások száma: 257

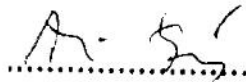
ebből az értekezés témájában: 7

ebből az értekezés témájában: 14,154

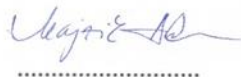
ebből az értekezés témájában: 113

Társszerzői lemondó nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy a jelölt téziseit ismerem, a tézisekben foglalt tudományos eredményeket fokozat megszerzéséhez nem használtam fel és azokat ilyen célból a jövőben sem fogom.



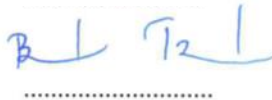
Aradi Tamás



Posztósné Dr. Majzik Andrea



Dr. Kunné Dr. Pál Edit



Bujdosó Tamás