Doktori (Ph. D.) értekezés tézisei

Kétdimenziós rendezett cink-oxid nanostruktúrák optikai és fluoreszcenciás tulajdonságai

Ábrahám Nóra

Témavezető: Dr. Dékány Imre
egyetemi tanár, az MTA rendes tagja

Kémia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék
MTA-SZTE Szupramolekuláris és Nanoszerkezetű Anyagok Kutatócsoport
Szeged, 2013

Bevezetés és célkitűzések

A nanoszerkezetű anyagok előállítása és a tömbi fázistól eltérő tulajdonságaik vizsgálata számos anyagtudományi kutatás középpontjában áll. A nanoméretű anyagokat tömbfázisú anyagok bevonataként alkalmazva az eredeti tárgy új, a szerkezeti tulajdonságokat meghaladó funkció ellátására lehet alkalmas (például antireflexiós, öntisztuló vagy antibakteriális felületek). A nanorészecskék egyedi tulajdonságain túlmenően meghatározó szerepe van annak, hogy milyen struktúrába (2D vagy 3D) rendezzük őket. Egy meghatározott szerveződés esetén például olyan új optikai tulajdonságokkal rendelkező szerkezetet kaphatunk, ami sem a tömbfázis, sem pedig a nanorészecskék szabálytalan struktúrája esetén nem figyelhető meg. Jó példa erre a fotonikus kristály, amelyeknél a nanoléptékű periodikusságnak köszönhetően az úgynevezett fotonikus tiltott sáv megjelenése figyelhető meg.

Az elmúlt néhány évtizedben jelentős fejlődést tapasztalhattunk monodiszperz nanorészecskék szabályozott szintézise és rendezett struktúrákba történő szervezése kapcsán. Számos olyan új eljárást fejlesztettek ki ezen anyagok szintézisére, amelyeknél lényeges, hogy az egyes részecskék felületi és strukturális tulajdonságai minimális hibahatáron (átlagos érték körüli szórás kisebb, mint 5%) belül egyezzenek, ugyanis csak ezekkel az azonos méretű részecskékkel valósítható meg tökéletes (pl. hexagonális) rendezettség. A kristályos rendbe szerveződött részecskék különböző területeken alkalmazhatók: a kétdimenziós rendezett struktúrák litográfiás technikáknál maszkként használhatók, a háromdimenziós rendszerek optikai szenzorként funkcionálhatnak, orvosi és biológiai területen fehérjék, baktériumok kimutatására alkalmas szenzorokat fejlesztettek, továbbá modell rendszerekként vizsgálva számos fizikai jelenség tanulmányozható velük.

Munkám során rendezett, kétdimenziós filmek előállítását tűztem ki célul, amelyhez a gömb alakú és monodiszperz építőköveket ZnO részecskék szabályozott szintézisével valósítottam meg. A rendezett kétdimenziós filmek létrehozására többféle módszert is alkalmaztam: víz/levegő határfelületben Langmuir-filmeket készítettem, majd ezeket a Langmuir-Blodgett (LB) technika segítségével szilárd hordozóra vittem át. A Langmuir-Blodgett technika nagy előnye, hogy a szabályos részecskékből rétegenkénti építkezéssel pontosan szabályozható szerkezetű filmek hozhatók létre. A templát által irányított önrendeződéses filmképzési eljárással sikerült létrehoznom a ZnO részecskék mintázatait. Az előállított részecskék szerkezeti tulajdonságainak megismerését követően, azok szilárd hordozós filmjeik érdekes optikai és fluoreszcenciás tulajdonságaira kívántam rávilágítani.

A 3-7 nm mérettartományban előállított ZnO részecskék méretfüggő fluoreszcencia emissziós jellemzőinek tanulmányozását követően szilárd hordozós filmjeik emissziós tulajdonságát vizsgáltam. Célom volt, hogy Au-ZnO hibrid filmek létrehozásával felderítsem a fém-félvezető plazmonikus kölcsönhatás emisszióra való hatását, amelyet azután előnyösen lehet alkalmazni a szenzorfejlesztés területén, például a fém által erősített fluoreszcencia elvén működő detektálási módszer kidolgozásánál.

A 200-500 nm mérettartományban előállított monodiszperz, szabályos gömb alakú részecskék kiválóan alkalmasak rendezett filmek kialakítására. Célom volt, hogy Langmuir-Blodgett-filmjeik reflexió spektrumaira egy megfelelő optikai modell megalkotásával olyan spektrum illesztést végezzek, amely különböző gázok/gőzök detektálásánál hasznosítható. Ezekkel a részecskékkel önszerveződéses elven sávos mintázatok készítését tűztem ki célul; szerkezeti és optikai tulajdonságaik vizsgálata mellett jellemezni tudtam a fotoemissziós sajátságaikat is.

Kísérleti anyagok és módszerek

A közel monodiszperz, gömb alakú ZnO részecskék szintéziséhez kétféle módszert alkalmaztam, amelyekkel nagyságrendileg különböző mérettartományba eső szabályos részecskéket állítottam elő.

I. A 3-7 nm mérettartományban közel monodiszperz részecskéket szintetizáltam cink-acetát-dihidrát lúgos közegű hidrolízisével etanolos közegben [*Meulenkamp et al, 1998, J Phys Chem B*].

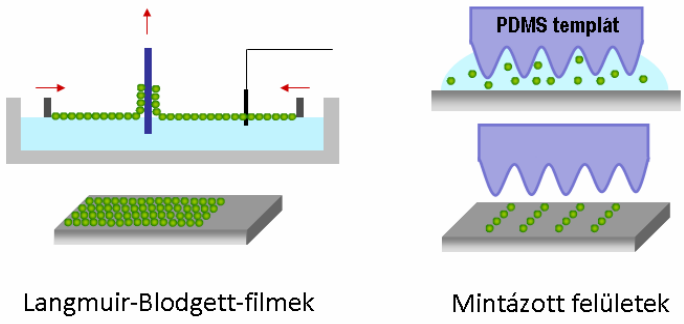
- ♦ A részecskék méretének meghatározására és etanolos szoljaik stabilitásának vizsgálatára UV-Vis abszorbancia, dinamikus fényszórási, valamint transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) méréseket végeztem. Pormintákat készítettem röntgendiffrakciós (XRD) szerkezet analízisre a kristályosság jellemzésére, illetve a jellemző kristályméret meghatározására. A részecskék emissziós tulajdonságainak jellemzésére fluoreszcencia emissziós spektrumokat vettem fel.
- ♦ A részecskék víz/levegő határfelületben létrehozott Langmuir-filmjeit oldalnyomás vs. terület izotermákkal jellemeztem, a méréseket Kibron MicroTroughS típusú Langmuir-mérlegben végeztem szobahőmérsékleten (25±1 °C).
- ♦ A vízfelszíni filmeket a Langmuir-Blodgett technika (1. ábra) segítségével szilárd hordozóra vittem át. A kvarc- és üveghordozón lévő filmek szerkezetét atomerő

mikroszkópos képekkel, optikai tulajdonságaikat UV-Vis abszorbancia spektrumokkal, emissziós tulajdonságaikat fluorimetriás (Horiba Jobin Yvone Fluoromax-4) mérésekkel jellemeztem.

- ♦ A ZnO részecskék emissziós tulajdonságainak módosításához arannyal bevont hordozókra építettem fel Langmuir-Blodgett-filmjeiket. Kétféle aranybevonatú hordozót alkalmaztam: (i) 10 nm-es Au részecskék szolját porlasztásos filmképzési technikával kvarchordozóra vittem fel, illetve (ii) üveghordozóra párologtatott 50 nm vastagságú folytonos Au filmet használtam. A fém és a félvezető közé távtartóként sztearinsav rétegeket építettem be az LB technikával. Az Au-ZnO hibrid filmek tulajdonságait XRD mérések, UV-Vis abszorbancia és fluoreszcencia emissziós mérések alapján elemeztem.

II. A 200-500 nm mérettartományban szabályos gömb alakú, monodiszperz ZnO részecskéket állítottam elő, cink-acetát-dihidrát hidrolízisével dietilén-glikol közegben, autoklávban [*Jezequel et al, 1994, Mat. Sci. Forum*].

- ♦ A részecskék méretének, szerkezetének jellemzésére transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) és pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) képek készültek, kristályosságukra XRD diffraktogramok értékeléséből következtettem, fajlagos felületüket, pórusosságukat N_2 adszorpciós-deszorpciós vizsgálatok alapján határoztam meg.
- ♦ Létrehoztam a részecskék vízfelszíni Langmuir-filmjeit, a részecskék szerkezetképzésére, a vízfelszíni film rendezettségére oldalnyomás vs. terület izotermák alapján vontam le következtetéseket.
- ♦ Előállítottam a részecskék egy- és többrétegű Langmuir-Blodgett-filmjeit kvarc- és üveghordozókon. A részecskék rendezettségét SEM felvételekkel jellemeztem, az optikai tulajdonságaik vizsgálatához transzmittancia és reflektancia spektrumokat mértem, továbbá fluoreszcencia emissziós vizsgálatokat is végeztem.



1. ábra. A rendezett kétdimenziós filmek előállításához alkalmazott technikák.

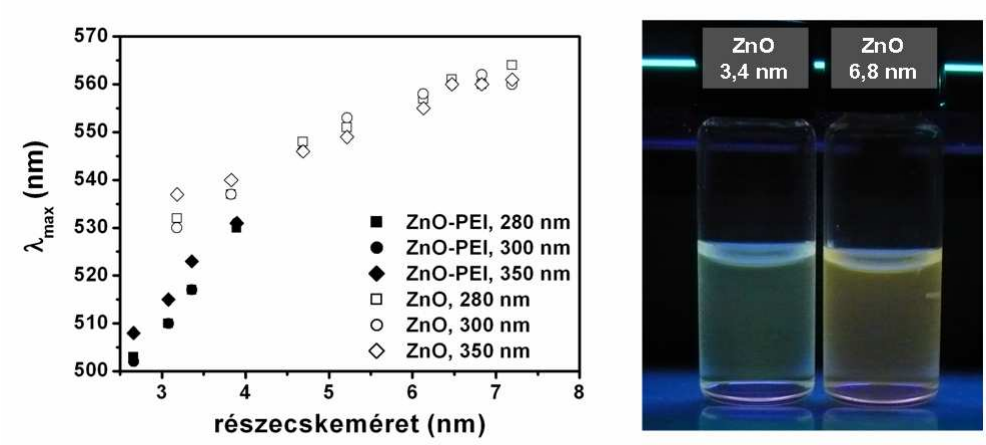
- Kvarc és arannyal bevont üveghordozókon templát (polidimetil-sziloxán, PDMS) által irányított önrendeződéses módszerrel a ZnO részecskék mintázatait hoztam létre (1. ábra). A részecskék rendezettségét SEM képekkel . A sávos mintázatok hullámhosszát lézer diffrakciós módszerrel határoztam meg, optikai tulajdonságainak jellemzésére UV-Vis transzmittancia spektrumokat mértem, továbbá fluoreszcencia emissziós vizsgálatok során jellemeztem a sávos mintázat arannyal való kölcsönhatásának befolyását az emissziós spektrumra.

Az értekezés tézisei

T1. *A 3-7 nm mérettartományban előállított ZnO részecskék Ostwald-féle öregedése, szolstabilizálás, méretfüggő fluoreszcencia emissziós tulajdonságok meghatározása.*

a./ Az etanolos közegben előállított ZnO részecskék szoljainak szobahőmérsékleten történő tárolásnál UV-Vis abszorbancia spektrumok mérésével megfigyeltem a részecskék Ostwald-féle öregedését, amely során a részecskék átlagos mérete a szintézis után tovább nő. A szolstabilitás növelésére a részecskék felszínének borításával sztérikus stabilizáló hatású polielektrolit (polietilénimin, PEI) sikeresen alkalmazható. A PEI jelenlétében (0,4 %) végzett szintézissel kisebb átlagos átmérőjű részecskéket lehet előállítani, továbbá ezek a szolok szobahőmérsékleten tárolva hosszú ideig stabilak maradtak. Alacsony hőmérsékletű (~ 5°C) tárolással is jelentősen javítható a szolstabilitás, egyéb stabilizálószer adagolása nélkül.

b./ A módosítatlan részecskék fluoreszcencia emissziós spektrumain egy gyenge UV és egy erősebb látható emisszió jelenik meg. A részecskék felületének PEI-vel való beborításával az UV emisszió kioltódik, a látható pedig felerősödik. Ennek oka, hogy a két emisszió versengő folyamat: a PEI elősegíti az excitonok felületi hibahelyekhez kötődő relaxációját (ezáltal nő a látható emisszió), ugyanakkor kedvezőtlenül hat a direkt rekombinációra (UV emisszió). A részecskeméret lassú növekedését használva méretfüggő emissziós sajátságokat állapítottam meg (2. ábra). A módosítatlan és a PEI-vel stabilizált részecskék esetén is közelítőleg 30 nm vörös eltolódást mutattam ki. A PEI-vel borított ZnO részecskék látható emissziója azonban alacsonyabb hullámhosszaknál jelentkezett.



2. ábra. a) A ZnO részecskék méretfüggő emissziós maximuma (különböző gerjesztő forrásokkal) b) Különböző méretű részecskéket tartalmazó szolok emissziójának színe.

T2. *A 3-7 nm mérettartományban előállított ZnO részecskék vízfelszíni Langmuir filmjeinek filmképzése, szerkezete*

A víz/levegő határfelületbe felvitt ZnO és PEI-vel módosított ZnO részecskékből is sikeresen kialakíthatók Langmuir-filmek, amelyek szilárd hordozóra vihetők át. Megállapítottam, hogy a részecskék kis mérete és nagy felületi energiája miatt kohezív filmeket képeznek, a filmképzés során szigetes szerkezet alakul ki. A PEI-vel borított részecskék esetén a tömör vízfelszíni film kialakítása során a részecskék egy jelentősebb hányada az alsó vizes fázis felé elhagyja a határfelületet a stabilizáló polielektrolit jó hidratáltsága miatt, amely az oldalnyomás-terület izotermák alapján valószínűsíthető. Ennek ellenére létrehozható egy megfelelően tömör vízfelszíni ZnO részecskés film, amely sikeresen átvihető hidrofil felületű szilárd hordozókra is.

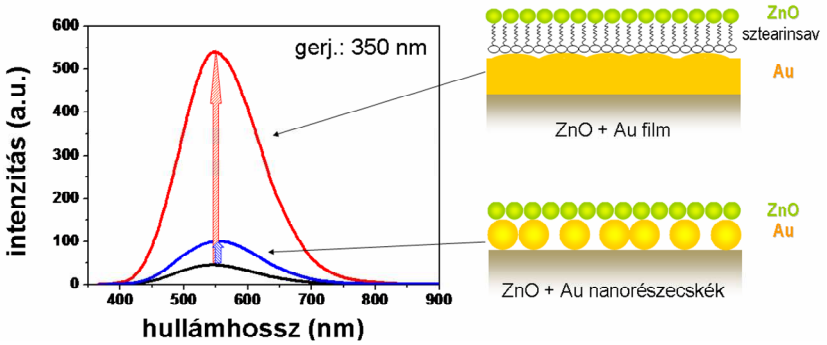
T3. *A 3-7 nm mérettartományban előállított ZnO részecskék Langmuir-Blodgett-filmjeinek fluoreszcencia emissziós tulajdonságai*

Kvarc hordozóra épített egy- és többrétegű Langmuir-Blodgett-filmek fluoreszcencia emissziós vizsgálata során megállapítottam, hogy mind a módosítatlan, mind a PEI-vel stabilizált részecskék megőrzik emissziós sajátságaikat a filmekben. A módosítatlan részecskék etanolos közegű szoljaiban egy gyenge UV emisszió és egy erős, látható emisszió jelenik meg; a filmjeikben megmarad a látható emisszió (1-2 nm eltolódás tapasztalható), a gyenge UV emisszió pedig kioltódik. A PEI-vel stabilizált részecskék filmjeiben a látható emisszió néhány nm-es eltolódással jelenik meg az etanolos közegű szoljaikhoz képest, az UV

emisszió pedig az etanolos közegű szoljaikhoz hasonlóan a filmek esetén nem mérhető. Az egy és többrétegű filmek fluoreszcencia emissziós spektrumán nem mutatkozik jelentős különbség a rétegszám változtatásával, minimális intenzitásbeli növekedés tapasztalható a ZnO film fajlagos (területegységre eső) tömegének növekedésével.

T4. *Plazmonikus kölcsönhatás kimutatása ZnO (3-7 nm) és Au tartalmú hibrid filmekben*

ZnO-Au nanohibrid filmekben kimutattam a fém-félvezető közti plazmonikus kölcsönhatást: megváltozott a ZnO emisszió erőssége, és a maximum helye is (3. ábra). Az Au nanostrukturáltsága meghatározó szerepű a kölcsönhatás során: a 10 nm-es részecskék esetén jóval kisebb eltolódás illetve erősítés tapasztalható, mint az 50 nm vastag filmek esetén. Ennek oka egyrészt a részecskék és a folytonos film körül kialakuló lokális elektromos tér eltérése, másrészt szerepe lehet az Au mennyiségében lévő különbségnek a két filmben (a folytonos Au film film területegységen nagyobb mennyiségű aranyat tartalmaz).



3. ábra. Plazmonikus kölcsönhatások következtében létrejövő fluoreszcencia erősítés a ZnO-Au nanohibrid filmek esetén

A fém és a félvezető közé beépített sztearinsav távtartó rétegekből következtetni lehet a kölcsönhatás távolságfüggésére. Megállapítottam, hogy az 50 nm-es Au filmre épített minták esetén a legnagyobb erősítés (12x) egy távtartó réteggel (2,2 nm XRD mérésekből meghatározva), a legnagyobb eltolódás (7 nm) pedig két távtartó réteggel (4,4 nm) mérhetők. A 10 nm-es Au részecskék filmjeinél legnagyobb erősítés közvetlen kontaktus esetén (tehát távtartó nélkül), legnagyobb eltolódás pedig 1 távtartó réteg esetén mérhető. A kölcsönhatás a fém által erőstett fluoreszcencia (angolul: metal enhanced fluorescence) jelenségével magyarázható, amelynek során a fém-félvezető kölcsönhatás következtében felerősödött lokális elektromos erőtérben megnövekszik az emissziós folyamat kvantum hatásfoka, ezáltal pedig erősödik az emissziós intenzitás.

T5. *A 200-500 nm mérettartományban előállított monodiszperz, gömb alakú ZnO részecskék szintézisével és szerkezetvizsgálatával kapcsolatos megállapítások*

a./ A ZnO részecskék szintézisét ugyanannak az eljárásnak többféle változatával is kiviteleztem, eltérő eredményekkel. Egy kétlépéses eljárással [Seelig, Mater. Chem. Phys, 2003] bidiszperz rendszert sikerült előállítanom. A szintézis egylépéses változatát [Jezequel, Mat. Sci. Forum, 1994] zárt autoklávban végezve polidiszperz, mikrométeres méretű részecskék képződtek. Az autokláv levegőre nyitásával, atmoszférikus nyomáson monodiszperz, gömb alakú részecskéket kaptam, amelyek átlagos mérete a 200-500 nm mérettartományban hangolható, az átlagos méret körüli szórás 5% alatti.

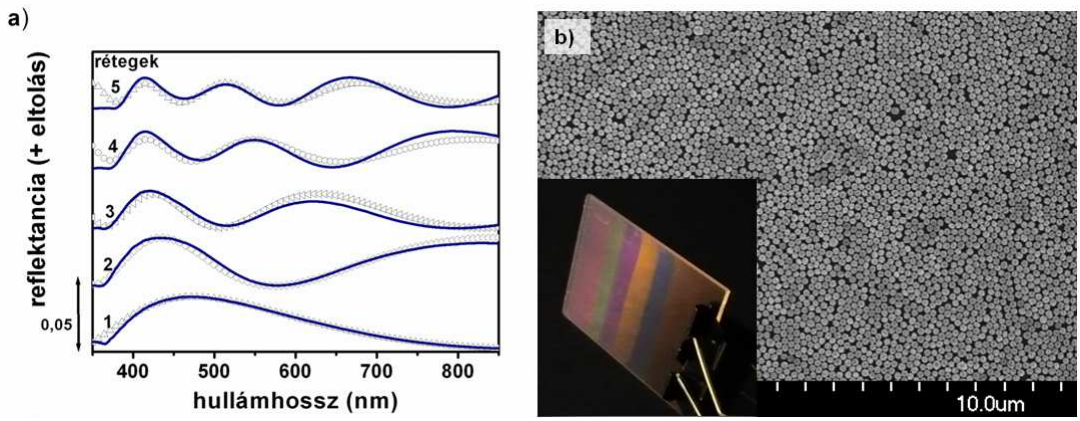
b./ Az előállított monodiszperz ZnO részecskék esetén a TEM és a SEM felvételek alapján igazolt aggregációs típusú növekedési mechanizmus alapján jelentős porozitás várható, amely N_2 adszorpciós-deszorpciós és kisszögű röntgenszórási (SAXS) módszerekkel kvantitatívan jellemezhető. A gázadszorpciós mérések eredményéből meghatározott fajlagos felület értékek 50-70 m^2/g tartományban vannak, az adszorpciós és a deszorpciós ág közötti hiszterézis alapján meghatározott átlagos pórusméret minden minta esetén 3 és 4 nm között volt. A mérésekből kapott teljes pórustérfogat alapján számolt részecske sűrűség (3,3-3,9 g/cm^3) és porozitás (30-40%) értékek a primer kristályok közötti hézagok jelenlétével magyarázható. A SAXS mérések alapján kapott fajlagos felület értékek jóval nagyobbak, mint a nitrogén adszorpciós mérések BET kiértékelésével kapottak, aminek oka, hogy a részecskék a nitrogén számára nem hozzáférhető zárt pórusokat tartalmaznak. Röntgen diffrakciós mérések igazolták a primer részek kristályosságát, a hexagonális wurtzit kristályrácsos ZnO-ra jellemző reflexiók azonosíthatók a diffraktogramokon. A kristályméret mintától függően 9 és 15 nm között volt.

T6. *A 200-500 nm mérettartományban előállított ZnO részecskék Langmuir-filmjeinek szerkezete, a részecskék rendezettsége*

A vízfelszínre terített részecskék oldalnyomás vs. terület izotermái alapján kimutattam, hogy a részecskék stabil filmet képeznek a határfelületben, nincs jelentős kohezivitás a részecskék között, amely megakadályozná a tömör illeszkedésben való elrendeződését. A terített mennyiség és a részecskék méretének ismeretében várt, illetve a mérések alapján meghatározott kontakt keresztmetszeti terület értékek jó egyezést mutattak, ami arra utal, hogy a részecskék tömör, hexagonális illeszkedésű vízfelszíni filmet képeznek.

T7. *200-500 nm mérettartományban előállított ZnO részecskék Langmuir-Blodgett-filmjeinek optikai tulajdonságaira vonatkozó megállapítások*

a./ A 234±11 nm-es részecskék 1-5 rétegű Langmuir-Blodgett-filmjeinek UV-Vis reflexió spektrumaira optikai modellezés számítások alapján illesztést végeztem (4. ábra). A tanszéken korábban kidolgozott modell kibővítésével a monodiszperz, gömb alakú részecskékből felépíthető hexagonálisan rendezett filmekre alkalmas számolási módszert kaptam. A modell jól alkalmazható egy és kétrétegű filmek esetében széles hullámhossz tartományban, azonban magasabb rétegszámoknál a modell szűkebb hullámhossz tartományban írja le jól a film viselkedését. Az optikai modell segítségével kapott effektív törésmutató és filmvastagság értékek azt mutatták, hogy az egymást követő rétegekben a részecskék egymás közeibe ülnek be, ezáltal a film vastagsága kevesebb, mint ahogyan a részecske átmérőjének rétegszámmal való szorzásával becsülhetjük.



4. ábra. a) A 234 nm-es ZnO részecskék 1-5 rétegű Langmuir-Blodgett-filmjeinek mért (folytonos vonal) és számított (szimbólum) reflektancia spektrumai, b) az egyrétegű film SEM képe, a fénykép az 1-5 rétegszámú filmek reflexióban látható eltérő színeit mutatja.

b./ A 301±12 , 349±14 és 457±16 nm-es részecskék egyrétegű filmjeinek UV-Vis transzmittancia spektrumain megjelenik a fotonikus kristályokra jellemző tiltott sáv. Az elsőrendű és másodrendű maximumok helyeinek pozíciójából meghatározható a filmek effektív törésmutatója, ez a módszer szignifikánsan magasabb törésmutatót eredményez, mint a reflexió spektrumok kiértékelésénél alkalmazott metódus. Ennek oka a törésmutató számítására használt optikai modell eltéréséből adódik. További számolásokkal becsülhetők a filmbeli részecske-részecske távolságok, az így kapott eredmények összhangban vannak a SEM felvételek alapján vártakkal.

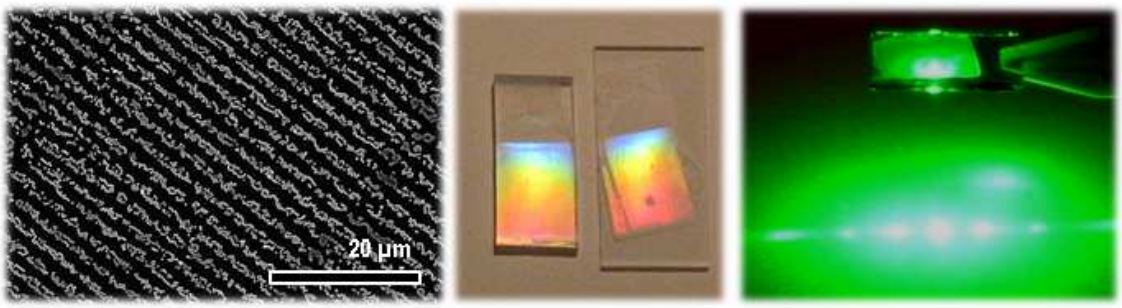
c./ A részecskék kvarc hordozós filmjeinek fluoreszcencia emissziós spektrumain a ZnO-ra általában jellemző UV (390 nm) és látható (564-575 nm) csúcs is megjelenik. A látható tartományban az emissziós maximum helyét a részecskéket alkotó primer kristályok mérete határozza meg. A primer egységek méretének növekedésével az emisszió vörös eltolódása figyelhető meg, amely méretkvantálási hatásokkal magyarázható. Ez az eredmény összhangban van a 3-7 nm mérettartományban előállított ZnO részecskéknél látott tendenciával.

T8. *ZnO részecskék (341±15 nm) mintázatképzésének optimalizálása*

A ZnO részecskék önszerveződéses mintázatképzésének optimalizálása során megmutattam, hogy a részecskék, a hordozó és a templát felületi tulajdonságai mellett további fontos paraméter a részecskék stabilitása a vizes közegben, valamint a templát periodikusságát jellemző hullámhossz. A legjobb rendezettséget módosítatlan részecskékkel, alacsony molekulatömegű PEI-vel (MW: 800) borított hordozóval, 2-2,5 µm hullámhosszal jellemezhető, hidrofób felszínű bélyegzővel, illetve frissen vízbe átvitt részecskékkel értem el. Kvarc mellett arannyal bevont üveghordozókon is sikeresen létrehozhatók a mintázatok a kvarccal megegyező felületmódosítást követően. A SEM felvételek (5. ábra) azt mutatják, hogy a sávok nem egy részecskesort tartalmaznak, hanem egy szélesebb sávban rendezetlenül elhelyezkedő részecskékből állnak.

T9. *ZnO mintázatok hullámhosszának meghatározása, fluoreszcencia emissziós sajátságai*

A kvarc és arannyal bevont üveg hordozókon létrehozott ZnO mintázatok periodicitását (hullámhosszát) SEM felvételek alapján és lézerdiffrakciós módszerrel is (5. ábra) meghatároztam. Az így kapott hullámhossz értékek jó egyezést mutattak. A lézerdiffrakciós mérések egyszerű és gyors utat biztosítanak a bélyegző felszíni inhomogenitásának jellemzésére. Kimutattam a templát felszínén a hullámhossz inhomogenitását, amely a felszíni strukturálás során létrejött egyenlőtlen feszültségeloszlás következménye. A bélyegző periodicitását jellemző hullámhossz a középső részen a legnagyobb, a szélek felé haladva pedig csökken.



5. ábra. a) A 341 nm-es ZnO részecskék mintázatának SEM képe, b) a fénykép a mintázat és a hozzá tartozó bélyegző azonos színét mutatja, c) lézerfény diffrakciója a mintázaton: az első és a másodrendű diffrakciós folt is látható.

A mintázott felületek fluoreszcencia emissziós spektrumán jól mérhetően megjelenik az UV (383 nm) és a látható (568 nm) emisszió is. A kvarc hordozóhoz képest az arany felületen előállított mintázatok látható emissziója 11 nm-rel eltolódott, az UV emisszió helye változatlan, valamint az emissziós intenzitás nagyjából a duplájára nőtt. A fém által erősített fluoreszcencia jelenségével magyarázható a kvarchordozóhoz képest mért erősítés és hullámhossz eltolódás.

Tudományos közlemények

Az értekezés témájában született dolgozatok:

1. **N. Ábrahám**, I. Dékány
Size-dependent photoluminescence properties of bare ZnO and polyethylene imine stabilized ZnO nanoparticles and their Langmuir–Blodgett films
Colloid. Surf. A.: Physicochem. Eng. Aspects, 364 (2010) 26–33.

IF_{2010}: 2,130

2. **N. Ábrahám**, D. Sebők, Sz. Papp, L. Kőrösi, I. Dékány
Two dimensional arrangement of monodisperse ZnO particles with Langmuir-Blodgett technique
Colloid. Surf. A.: Physicochem. Eng. Aspects, 384 (2011) 80-89.

IF_{2011}: 2,236

3. **N. Ábrahám**, I. Dékány:
Enhanced photoluminescence of ZnO Langmuir-Blodgett films on gold coated substrates by plasmonic coupling
J. Phys Chem C, 116 (29), pp 15667–15674.

IF_{2011}: 4,805

4. **N. Ábrahám**, C. Hanske, M. Müller, A. Fery, I. Dékány
Patterned assemblies of ZnO particles on gold
szerkesztés alatt

IF:

Σ IF: 9,171

Az értekezés témájához részben vagy nem kapcsolódó dolgozatok:

5. E. Hild, A. Deák, L. Naszályi, Ö. Sepsi, **N. Ábrahám**, Z. Hórvölgyi
Use of the optical admittance function to stimulate and evaluate transmittance spectra of graded-index colloidal films
J. Optics A: Pure and Appiled Optics 9 (2007) 920-930.

IF_{2007}: 1,752

6. L. Naszályi Nagy, **N. Ábrahám**, E. Hild, D. Cot, A. Ayral, Z. Hórvölgyi
Complex Langmuir-Blodgett films of SiO_2 and ZnO nanoparticles with advantageous optical and photocatalytical properties
Langmuir 24 (2008) 12575-12580.

IF_{2008}: 4,097

7. L. Naszályi Nagy, **N. Ábrahám**, E. Hild, A. L. Kovács, A. van der Lee, V. Rouessac, D. Cot, A. Ayral, Z. Hórvölgyi
Zinc oxide LB films with improved antireflective, photocatalytic and mechanical properties
Progr Colloid Polym Sci 135 (2008) 107-118.

IF_{2008}: 1,736

Összesített hatástényező: 16,756

Konferencia szereplések / előadások:

1. **N. Ábrahám**, I. Dékány: Photoluminescence enhancement of ZnO particles on gold coated substrates by plasmonic coupling, International Workshop on Functional Nanostructured ThinFilms, Budapest, Hungary, 13th December 2012.

2. **N. Ábrahám**, E. Csapó, I. Dékány: Langmuir monolayer study of the interaction of biofunctionalized gold nanoparticles with model phospholipid membranes. 5th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN) 24th-27th October 2012, Szeged, Hungary, Abstr. O28

3. **N. Ábrahám**, E. Csapó, I. Dékány: Interaction of biofunctionalized gold nanoparticles with model lipid membranes, AMSALS2012 Conference, Siófok, Hungary, 3rd-6th June 2012. Abstr. OC49

4. **N. Ábrahám**, I. Dékány: Enhanced photoluminescence of ZnO films on gold coated glass by plasmonic coupling, 25th ECIS Conference, Berlin, Germany, 4th-9th September 2011, Abstr. 430.

5. L. Naszályi és **N. Ábrahám** (közös előadás), A. Ayral, Z. Hórvölgyi: Stabilized Langmuir-Blodgett films of nanoparticles for photocatalytic application, 2nd European COST 540 WG1 Seminar, Toulouse, 2007

Konferencia szereplések / poszterek:

6. **N. Ábrahám**, E. Csapó, I. Dékány: Interaction of biofunctionalized gold nanoparticles with model lipid membranes, AMSALS2012 Conference, Siófok, Hungary, 3rd-6th June 2012. Abstr. P31

7. **N. Ábrahám**, D. Sebők, S. Papp, L. Kőrösi and I. Dékány: Preparation and investigation of monodisperse ZnO particles and their Langmuir-Blodgett films, EuroNanoForum 2011, Budapest, Hungary, 30th May - 1st June 2011, Abstr 306

8. **N. Ábrahám**, D. Sebők, Sz. Papp, I. Dékány: Optical and photoluminescence properties of different sized ZnO particles, 24th ECIS Conference, Prague, Czech Republic, 5th-10th September 2010, Abstr. P4.53

9. **N. Ábrahám**, I. Dékány: Optical and photoluminescence characteristics of ZnO Langmuir-Blodgett films, 7. Országos Anyagtudományi Konferencia (angolul: 7th Hungarian Conference On Materials Science), Balatonkenese, 2009 okt. 11-13., Abstr.: P-02

10. Á. Detrich, L. Naszályi, A. Deák. A. Ayral., **N. Ábrahám**., Z. Hórvölgyi: Nanoparticulate coatings: Fabrication and model investigations, PORANAL 2008 Symposium, Debrecen, 2006, Abstr. P5

11. **N. Ábrahám**, L. Naszályi, A. Ayral, Z. Hórvölgyi: Preparation of nanoparticulate coatings by wet colloid chemical routes: optical and photocatalytic properties, 9th Conference on Colloid Chemistry, Siófok, Hungary, 3rd-5th October 2007, Abstr. P.1

12. Lívia Naszályi, **Nóra Ábrahám**, Attila L. Kovács, Péter Baranyai, Didier Cot, André Ayral and Zoltán Hórvölgyi: Post modification of Langmuir-Blodgett films of ZnO nanoparticles for improving their mechanical and chemical stability, 9th Conference on Colloid Chemistry, Siófok, Hungary, 3rd-5th October 2007, Abstr. P.48

13. **N. Ábrahám**, L. Naszályi Nagy, Z. Hórvölgyi: Stability experiments on multifunctional nanoparticulate coatings, XIII. International Conference on Chemistry, Cluj Napoca, Romania (XIII. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Kolozsvár, Románia) 2007

14. L. Naszályi, **N. Ábrahám**, A. Deák, A. L. Kovács, A. Ayral, E. Hild, Z. Hórvölgyi: Preparation and Characterization of Nanoparticulate Langmuir-Blodgett Films with Gradient Refractive Index, 20th ECIS Conference, Budapest, Hungary 17-22 September 2006, Abstr. P6.23

TÁRSSZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott nyilatkozom, hogy a

Nóra Ábrahám, Dániel Sebők, Szilvia Papp, László Kőrösi, Imre Dékány: *Two dimensional arrangement of monodisperse ZnO particles with Langmuir-Blodgett technique,* Colloid. Surf. A.: Physicochem. Eng. Aspects, 384 (2011) 80-89.

közlemény elkészítésében Ábrahám Nórának meghatározó szerepe volt. A dolgozatban közölt eredményeket tudományos fokozat megszerzéséhez nem használtam fel és azt a jövőben sem teszem.

.....

Dr. Sebők Dániel

.....

Kőrösiné Dr. Papp Szilvia

.....

Dr. Kőrösi László

.....

Dr. Dékány Imre