

**Energiatudományi Kutatóközpont  
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet  
időszaki szakmai projekt összefoglaló**

**Új félvezető anyagok  
TKP2021-NKTA-05  
2022.01.01 – 2022.12.31**

## **Kivonat**

*A félvezető anyagok alapvető fontosságúak az ipar és digitalizáció számos területén. A digitális elektronikai eszközök, a hatékony fényforrások (LED), valamint az érzékelők széles skálája félvezető eszközökre épül. Olyan újszerű 2D és 3D nanoszerkezeteket hoztunk létre, melyek kis energia fogyasztású félvezető eszközökben használhatók. Pl. sikerült egy egyszerű módszerrel MoS2 réteget szintetizálni SiC félvezető hordozón és abban erősítésre alkalmas Esaki dióda jelleg volt megfigyelhető. Közelebb kerültünk ahhoz, hogy adott tulajdonságú 2D anyagokat egymásra helyezve tervezhető tulajdonságokat kapjunk. Előrébb jutottunk a hidrogén vízből való előállításának katalízisében, amely a hidrogén valóban zöld előállítását ígéri.*

Az időszaki eredményeket az alábbiak szerint részletezzük:

### **2D-MoS2 növesztése**

*Kidolgoztunk egy nagyon egyszerű eljárást, amivel Mo porlasztásával és a réteg kén gőzben való hőkezelésével a felületen homogén, ugyanakkor vékony MoS2-ot lehet előállítani. Egykristály félvezetőre, szándékosan erősen adalékolt SiC-ra (n+) leválasztva 2D MoS2-t (p+) Esaki dióda jellegűt sikerült kimérni.*

- Az új félvezető anyagok közt általában kétdimenziós (2D) anyagokat vizsgáltunk, de akadt 1D-nek tekinthető rendszer is, amikor sikerült BN (bórnitrid) csövekben grafén nanoszalagokat létrehozni. A preparáció szobahőmérsékleten, triklórbenzolban történő folyadékfázisú töltéssel, majd ezt követő hőkezeléssel történt. Mind a Raman, mind a TEM (Transmission Electron Microscopy) vizsgálatok megerősítették a grafén nanoszalagok létrejöttét. (Cadena et al. Phys. Status Solidi RRL 2022, 2200284)
- Többféle módszerrel állítottunk elő 2D MoS2 rétegeket. Az egyik módszer a PLD (Pulsed Laser Deposition) volt, amit szlovák együttműködő partnerek választottak le többféle egykristály hordozóra. A módszer előnye, hogy a hordozók teljes felületén kialakul egy általában bilayer (néha vastagabb) MoS2, ugyanakkor nagyon homogén a réteg. Hexagonális SiC-ot (4H-SiC) használva hordozónak, sikerült 2D/3D félvezető átmeneteket előállítani. Ezeket a szerkezeteket részletesen vizsgáltuk TEM-mel és Raman spektroszkópiával, míg olasz partnereink az átmenetek elektromos tulajdonságait tárták fel vezető atomerő mikroszkópiával (C-AFM). A tipikusan három rétegből álló MoS2 tulajdonságai a SiC-on erősen függenek a hordozó adalékoltóságától. (F. Giannazzo et al. Adv. Mater. Interfaces 2022, 2201502)
- Kidolgoztunk egy olyan nagyon egyszerű eljárást, amivel Mo (molibdén) porlasztásával és a réteg kén gőzben való hőkezelésével szintén a felületen homogén, ugyanakkor vékony MoS2-ot lehet előállítani. A Mo porlasztás Cataniában a kén gőzben való hőkezelés Budapesten történt a korábban is ilyen rétegek növesztésére használt CVD (Chemical Vapor Deposition) kályhában. A CVD módszer MoO3 oxidból és kénből állított elő MoS2-t, de itt is pontosan ez történt, hiszen a porlasztott Mo mindig oxidálódik. A hordozót, rajta az MoO3 réteggel 800°C-on tartottuk, míg a kén gőzt 150°C-os kén porból nyertük. Az első kísérletek inert SiO2 hordozón történtek és a paraméterektől függően három réteg, vagy vastagabb MoS2-t sikerült előállítani, ahogy az a TEM vizsgálatokból kiderült. Ramant használva a rétegekben fellépő feszültséget,

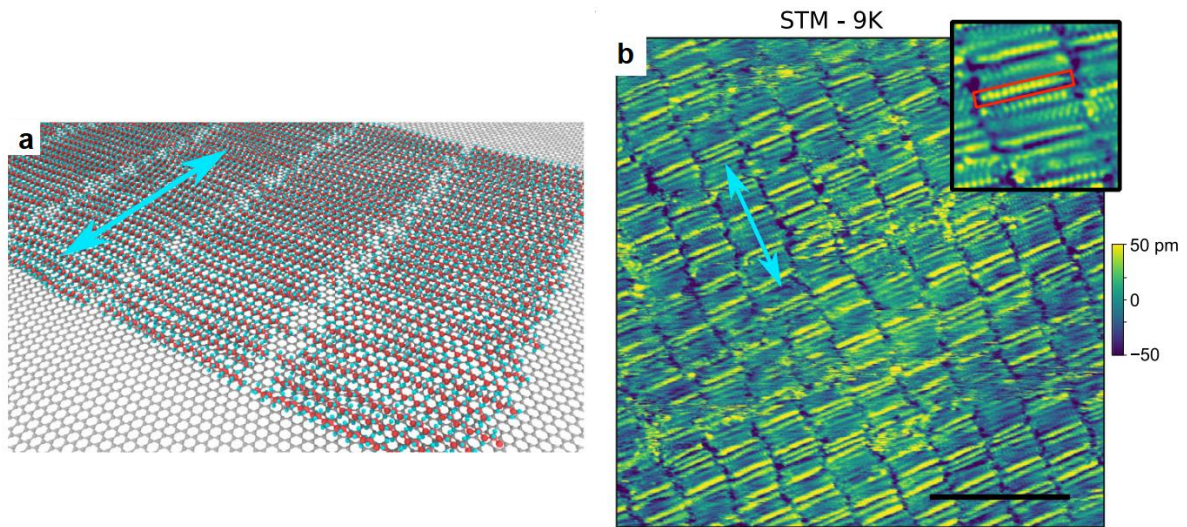
XPS (fotoelektron spektroszkópia) segítségével a rétegben maradt oxigén tartalom és az abból adódó doppelás is meghatározható volt. (S.E. Panasci et al. Nanomaterials 2022, 12, 182.)

- Természetesen egykristály félvezetőre, jelesül SiC-ra is leválasztottunk illetve hőkezeltünk a fenti módszerrel rétegeket. A legérdekesebb tulajdonságokat akkor figyeltük meg, amikor a hordozó adalékolása szándékosan nagy volt (n+) ugyanakkor a 2D MoS<sub>2</sub> adalékoltsága p+, ekkor ugyanis Esaki dióda jellegű sikerült kimérni az elektromos mérésekkel. Mivel ez a negatív differenciális ellenállás szobahőmérsékleten is stabil, ezért a módszer igazi elektronikai alkalmazásokat ígér. (F. Gianazzo et al. Adv. Mater. Interfaces 2022, 9, 2200915)
- Beszerelésre, illetve 2022 decemberében installálásra került a Scanning Auger (FEG1000) kiegészítés az Energiatudományi Kutatóközpont mintegy féléves Escalab Xi+ típusú fotoelektron spektrométerére (XPS). Ezzel lehetővé vált elemtérképek készítése a 100 nm felbontással.

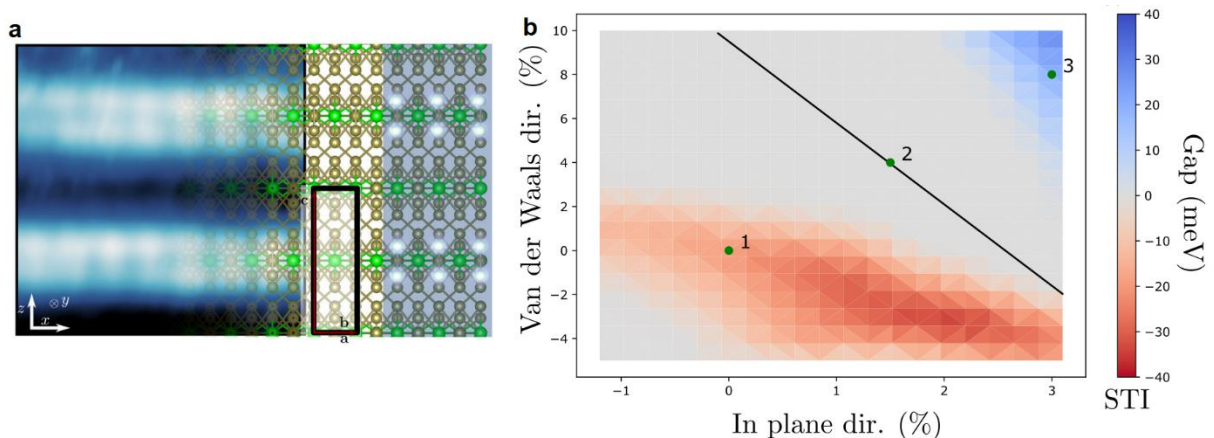
## 2D kristályokból atomi rétegenként felépített 2D kvantum anyagok

*Megmutattuk, hogy mechanikai feszültség segítségével a ZrTe<sub>5</sub> kristály toplogikus tulajdonságait (elektronszerkezetét) hangolni tudjuk, ezáltal sikerült egy triviális (fém) - toplogikus (félvezető) átalakulást indukálni. Alacsony hőmérsékletű alagútspektroszkópiai mérésekkel feltártuk egy különleges szerkezetű (ABC), néhány rétegű grafén kristály elektronszerkezetét. STM mérésekkel először sikerült atomi felbontásban megfigyelni 2D kristályok (grafén, MoS<sub>2</sub>, h-BN) felületén kialakuló szabályos (önszerveződött) molekularéteg szerkezetét. Az eredmények gyakorlati jelentősége abban rejlik, hogy pontosabban meg tudjuk érteni és tervezni valós körülmények között a 2D kristályokra épülő eszközök működését.*

- Alacsony hőmérsékletű pásztázó alagútmikroszkópos (STM) mérésekkel először sikerült atomi felbontásban megfigyelni a réteges van der Waals kristályok (grafén, MoS<sub>2</sub>, h-BN) felületén kialakuló molekularéteg szerkezetét. Azt találtuk, hogy a levegőnek kitett 2D kristályok felületén, néhány nap alatt egy szabályos (önszerveződött) molekularéteg alakul ki, 20 - 26 atom hosszú láncszerű molekulalábkból. Részletes felületérzékeny vizsgálatokkal (IR, XPS) sikerült azonosítani, hogy az STM mérésekben megfigyelt hosszú láncszerű molekulák normál alkánok. Az eredmények gyakorlati jelentősége, egyrészt abban rejlik, hogy pontosabban meg tudjuk érteni és tervezni valós körülmények között a 2D kristályokra épülő eszközök működését, másrészt a kialakuló szabályos molekula fedőréteget ki lehet használni az érzékeny 2D kristályok megvédésre a környezeti hatásoktól. [Nature Comm. 13, 6670 (2022)]
- Alacsony hőmérsékletű alagútspektroszkópiai mérésekkel feltártuk egy különleges szerkezetű, úgynevezett ABC rétegződésű néhány rétegű grafén kristály elektronszerkezetét. A grafit e ritka kristályformájának az a különleges tulajdonsága, hogy a felületén alacsony diszperziójú (lapos) sávok alakulnak ki, amelyekben újszerű korrelált elektron állapotok jönnek létre alacsony hőmérsékleten. Sikerült megmutatnunk, hogy az ABC grafit alapállapotában két korrelált állapot verseng egymással, nanométeres kiterjedésű térbeli doméneket formálva: egy antiferromágneses szigetelő és egy fémes korrelált paramágneses állapot. Az eredmények jelentősége abban rejlik, hogy egy nagyon egyszerű anyagban (pusztán szén atomokból felépülő kristályban) sikerült tanulmányozni ezeket az elektronállapotokat, ahol az eredmények modellezése és értelmezése sokkal könnyebb. Márpedig a korrelált elektronállapotok megértése a szilárdtestfizika egyik legnagyobb kihívása, amelyről olyan területek forradalmasítását várjuk, mint a szupravezetés vagy a kvantum mágnesség. [Science Adv. 8, eabo7879 (2022)]
- A korrelált elektronszerkezetek mellett, a toplogikus elektronszerkezetek szintén a korszerű szilárdtestfizikai kutatások középpontjában állnak. Jelentőségüket az adja, hogy a kristály szimmetriái által védett állapotokban az elektronok védettek a visszaszórás ellen, így ellenállás nélkül képesek vezetni az elektromos áramot, akár szobahőmérsékleten is. Egy ilyen nem triviális topológiájú sáv szerkezettel rendelkező kristály a cirkónium pentatellurid (ZrTe<sub>5</sub>). Megvizsgáltuk, hogyan tudjuk hangolni a ZrTe<sub>5</sub> toplogikus tulajdonságait mechanikai feszültség (deformáció) segítségével. Azt találtuk, hogy a kristály deformációjával sikerült egy erős-gyenge toplogikus szigetelő átalakulást indukálni, illetve felfedtük, hogy e két fázis között egy fémes állapot található. [npj Comp. Mater. 8, 177 (2022)]



Grafén felületén kialakuló, 20-26 szénatomos alkan láncokból felépülő önszerveződött molekularéteg szerkezeti modellje (a) és atomi felbontású STM képe (b).



a) Cirkónium pentatellurid ( $ZrTe_5$ ) kristály STM képe és szerkezeti modellje. b)  $ZrTe_5$  elektronszerkezete a rács mechanikai deformációjának függvényében egy átmenetet mutat az erős (1) és a gyenge (3) topologikus szigetelő fázisok között, amelyeket egy fémes (2) fázis választ el.

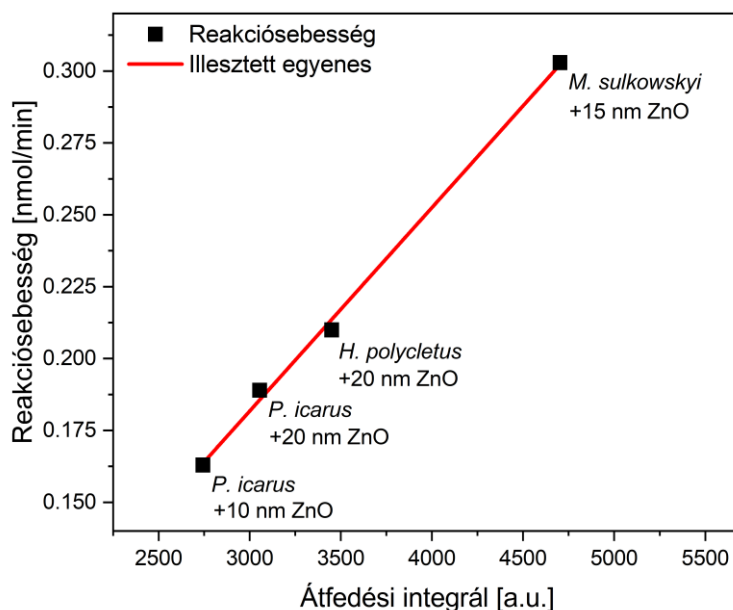
### Fotonikus nanoarchitektúrák

Különböző fajú lepkék fotonikus nanoarchitektúráira atomi rétegleválasztás módszerével (ALD) növesztett, konformális ZnO réteg akkor növeli leghatékonyabban a teszt festékanyag fotokatalitikus bomlását, ha hibrid fotonikus nanoarchitektúra fényvisszaverése és a festékanyag elnyelése jó átfedést mutat. Ez a vízben oldott különféle festékanyagok és gyógyszermaradékok eltávolítására lehet majd alkalmazható.

- A felszíni vizekben egyre növekvő arányban előforduló ipari és lakósági szennyvíz eredetű szennyezők exponenciálisan súlyosbodó környezeti fenyegetést jelentenek. A vízben oldott különféle festékanyagok és gyógyszermaradékok eltávolítása vagy semlegesítése igen komoly kihívást jelent. Ennek egyik leg gazdaságosabb és leginkább környezetbarát módja, ha a korlátlan mennyiségben rendelkezésre álló napenergiát alkalmazzuk a szennyezők eltávolítására. A fény által indukált, ún. fotokatalitikus reakciók a megfelelő katalizátorok felszínén ígéretes út a vízben oldott szennyezők semlegesítésére. Ennek egyik optimális

megoldása, ha nagy fajlagos felületű hordozókon olyan fotokatalizátor nanorészecskéket helyezünk el, amelyek felett áramoltatva a szennyezett vizet a nap fényének hatására bekövetkező kémiai reakciók a szennyezők lebontását eredményezik. A folyamat hatékonysága növelhető, ha maga a hordozó, amelyre a fotokatalitikus nanoszemcséket felvisszük, képes fokozni a fény és a nanoszemcsék közötti kölcsönhatást. A fotonikus kristály típusú anyagok rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal, azonban előállításuk költséges és nem ritkán környezetszennyező. Ugyanakkor számos lepkefaj szárnyain ilyen típusú anyagok adják a kék és zöld színeket. Ezért annak a lehetőségeit kutattuk, hogy a fotokatalitikus anyagokat és ezek nanorészecskéit hogyan lehet a lepkeszárnyak hierarchikusan felépülő fotonikus nanoarchitektúráival kombinálni a fotokatalitikus hatás fokozása érdekében. Érdekes itt megjegyezni, hogy a természetes selymet, már évezredek óta a háziasított selyemlepke gubóiból állítják elő, tehát a lepketenyésztés alkalmas lehet a megfelelő hordozók nagy mennyiségű előállítására is.

- A kísérletek során leginkább olyan lepkék szárnyait alkalmaztuk, amelyeket laboratóriumi körülmények között tenyésztettünk. Egyetlen szaporodó pártól több mint 600 utód nyerhető [ ]. Megállapítottuk, hogy a különböző fajú lepkék fotonikus nanoarchitektúráira atomi rétegleváltás módszerével (ALD) növesztett, konformális ZnO réteg akkor növeli leghatékonyabban a teszt festékanyag fotokatalitikus bomlását, ha hibrid fotonikus nanoarchitektúra fényvisszaverése és a festékanyag elnyelése jó átfedést mutat.
- Rodamin B fotokatalitikus bomlási sebességének függése a különféle lepkeszárny alapú, konformális ZnO réteggel bevont hibrid, biotemplát mintákon a hibrid fotokatalitikus nanoarchitektúra fényvisszaverése és a rodamin B fényelnyelésének átfedése függvényében.



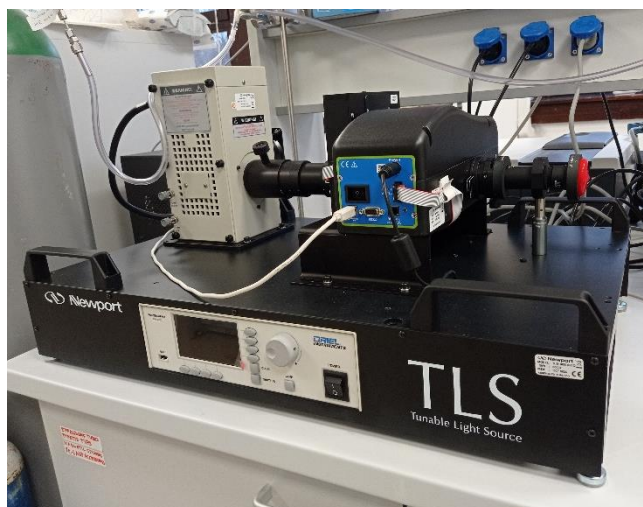
- Vizsgáltuk a nanorészecskék vizes alapú szuszpenziójából lepkeszárnyra felvitt plazmonikus arany és arany/ezüst ötvözet nanorészecskék hatását a hibrid nanoszerkezet optikai tulajdonságaira. Megállapítottuk, hogy a biológiai eredetű fotonikus nanoarchitektúra és a nanorészecskék együttesen egy újszerű tulajdonságokkal rendelkező hibrid nanoarchitektúrát alkotnak, amely nem csupán az alkotók tulajdonságainak összegzését mutatja. Megmutattuk, hogy biotemplát alapú hibrid fotonikus/fotokatalitikus nanoarchitektúrák optikai tulajdonságainak tervezett alakításával javítható a fotokatalitikus reakció hatékonysága.

### Katalizátor fejlesztés hatékony hidrogénfejlesztésre

Hidrogéngáz vízmolekulából történő hatékony termeléséhez új és olcsó, nanoszerkezetű katalizátorok kifejlesztésén dolgoztunk. A fotoelektrokémiai vízhasítás hatékonyvá válik, ha a határfelületi reakciókészséget javító ko-katalizátort ojtunk félvezetőre. Erre a célra egy egyszerű, Fe-tartalmú

*vegyületet alkalmaztunk nanopiramisos szerkezetű BiVO<sub>4</sub> félvezetőn A fejlesztés célja, hogy a napelemek elterjedésével előtérbe kerülő energiátárolási módszerek hatékonyabbak legyenek*

- A vízmolekulák bontására képes katalizátorok és előkatalizátorok egyik érdekes csoportja az átmenetifém komplexeké. Összefoglaló cikkben elemeztük egyes katalitikus hatású komplexek olyan redoxállapot-változásait, amelyekben a szerves ligandum és nem a fémcentrum a résztvevő. Kiemeltük, hogy milyen hasonlóságok jelenthetnek alapot további mesterséges rendszerek fejlesztésére a természetes oxigénfejlesztő komplex és a redox-közvetítő tirozin-hisztidin párok együttműködésével. (Benkó et al. Environmental Chemistry Letters 2022, 20, 3657-3695)
- A fotoelektrokémiai vízhasítás hatékonnyá válik, ha a határfelületi reakciókészséget javító katalizátort ojtunk félvezetőre. Erre a célra egy egyszerű, Fe-tartalmú vegyületet alkalmaztunk nanopiramisos szerkezetű BiVO<sub>4</sub> félvezetőn. Utóbbi szerkezete a hatékony fényenergia-konverzióhoz volt hangolva, de teljesítményét a V-szegény felületi rekombinációs helyek erősen korlátozták. A Fe-komplex in situ átalakult hematit nanorészecskékké a V-hiányos területeken, tompítva a fotoáram-korlátozó hatást. A fotoelektrokémiai kísérletek alapján a hematit egy nagyságrenddel javítja a töltésátviteli hatékonyságot, visszaszorítja a rekombinációt és csökkenti a töltésátviteli ellenállást. Összességében a hematit kisebb külső kényszerpotenciál mellett elnyomja a rekombinációt a V-szegény felületen, míg magas potenciálon oxidált reakciócentrumokat biztosít az oxigénfejlődéshez. (Benkó et al. Appl. Catal. A: Gen. – accepted)
- Beszereltünk egy széles hullámhossz-tartományon hangolható fényforrást (1. ábra), amely alkalmas összetett PEC (fotoelektrokatalitikus) elektródok vagy fotokatalizátorok vizsgálatára. Az új eszköz lehetővé teszi, hogy közelítőleg 4 nm-es hullámhosszfelbontás mellett meghatározzuk az egyes rendszerek kvantumhatásfokát, aminek nagy jelentősége van a látható fény hasznosítására alkalmas eszközök fejlesztésében.



A projekt keretében beszerzett és üzembe helyezett Newport TLS 130B-250Q típusú kompakt hangolható fényforrás.

#### **Félvezető és fém-félvezető hibrid nanorészecskék:**

*Különböző morfológiájú és összetételű kadmium kalkogenidek esetében az eltérő heteroátmenetek és fémek által vezérelt optikai és töltéshordozó transzfer folyamatokat vizsgálva rámutattunk, hogy a nanorészecskék felületi kémiája, illetve a részecskék közötti kölcsönhatások jelentős hatást gyakorolnak az optikai és spektroelektrokémiai tulajdonságokra*

- Az új félvezető anyagi rendszerek közül a vizsgálataink főként a félvezető nanorészecskés rendszerekre fókuszáltak. Különböző morfológiájú és összetételű kadmium kalkogenidek

esetében az eltérő heteroátmenetek által vezérelt optikai és töltéshordozó transzfer folyamatokat vizsgálva rámutattunk, hogy a nanorészecskék felületi kémiája, illetve a részecskék közötti kölcsönhatások jelentős hatást gyakorolnak az optikai és spektroelektrokémiai tulajdonságokra.

- A témában megjelent több publikáció közül a CdSe/CdX (X=S, Te) nanorészecskék irányított önszerveződését vizsgáló *Adv. Func. Mater.* cikkben nanolapkák önszerveződését vizsgáltuk. Amin (-NH<sub>2</sub>) végcsoporttal rendelkező felületi molekulák bekötődését követően polimerek segítségével oszlopokba rendeztünk a nanolapkákat (ún. *stack*-eket alakítva ki), melyekben a részecskék közötti távolság a különböző hosszúságú ligandumok segítségével hangolható. Sikeresen elértük a nanométer alatti nanorészecske-nanorészecske távolságok tartományát az oszlopokon belül, mely lehetőséget adott a fotogerjesztett töltéshordozók hatékonyabb transzportjára, így jelentősen megnövelhetővé vált a generált fotoáram.<sup>1</sup> A munkából a folyóirathoz borítót is publikáltunk.
- Az *Adv. Mater. Interfaces* folyóiratban megjelent cikkünkben félvezető-fémes többkomponensű krioaerogéleket állítottunk elő, melyek esetén rámutattunk, hogy a félvezető/fém kontaktus nanoléptékű tervezése drasztikusan befolyásolja a fotogerjesztett elektronok fémekbe (Au, Pt) történő transzportját különböző Cd-kalkogenid heteroátmenetek esetén. Hatékony töltéstranszport akkor érhető el, ha a fémes domént nedveskémiai úton növesztjük a félvezető nanorészecskés komponensekre; a két rendszer egyszerű keverése gátat szab az elektronok szabad delokalizációjának, így a többkomponensű részecskék nanoléptékű tervezése elengedhetetlen a későbbi alkalmazások tekintetében.
- Hibrid (biopolimer-nanorészecske) gélhálózatokat is létrehoztunk lenmagból kivont ún. ‘mucilage’ felhasználásával (*Macromolecular Rapid Comm.*), mely biopolymer mátrixban félvezető és mágneses nanorészecskéket oszlattunk el. A hibrid gélek megőrzik a nanorészecskék tulajdonságait, de új felhasználásnak nyitnak utat (hatóanyag-leadás, abszorbens).
- Az általunk nedveskémiai úton előállított plazmonikus (Au) és félvezető (Cu<sub>2</sub>O) nanorészecskék felhasználásával Biró Lászlóék sikeresen módosították a lepkeszárnyak spektrális választ, melyből két közlemény is született.
- Az arany nanoprizmák regio szelektív felületmódosításáról szóló tanulmányunkban (*Part & Part Syst Charact*) megmutattuk, hogy a prizmak éleire pozitív töltésű ligandumokat kötve lehetőség nyílik az ellentétes töltésű arany nanogömbökkel történő önszerveződésre.
- A BME Természettudományi Karának Fizika Tanszékével közösen (Dr. Lagzi István László) hoztunk létre és értelmeztünk olyan újszerű hierarchikus Liesegang mintázatokat, ahol az oldószer polaritásának változtatása a kialakuló CuCrO<sub>4</sub> mintázatok sűrűségére és több, különböző mintázat egyidejű létrejöttére is hatással van.
- A laboratóriumunkat felkészítettük olyan félvezető nanorészecskés szintézisek elvégzésére, melyek atmoszférikus körülmények között instabilak, oxidálódnak, vagy előállításuk lehetetlen a prekursorok levegő/víz érzékenysége miatt. Beszerzésre és üzembehelyezésre került két olyan eszköz is, melyekkel a szobalevegő teljes kizárásával oxigén és vízmentes környezetben tudunk kémiai eljárásokat és szintéziseket véghezvinni. Ennek fő eleme az inert gázos munkaállomás, melyben nitrogén atmoszférát hozunk létre és tartunk fent. Az oxigén szintjét ezzel közel 2 ppm-re, a vizet akár 0.1 ppm-re is le tudjuk csökkenteni. Nem csupán a nanorészecskék szintézisekor lehet ennek fontos szerepe, hanem azok kezelésénél, illetve a felhasznált vegyszerek stabilitásának biztosításánál.



*Inert gázos munkaállomás (glovebox)*

- A rendszer másik eleme az ún. Schlenk-line szintézisállomás (ld. ábra), mely egy vákuumozható és inert gázzal működtethető kémiai reaktor. A rendszer lehetővé teszi, hogy a kezdeti vegyszerekből minden oxigént és vizet vákuummal eltávolítsunk, majd a félvezető nanorészecskék szintézisét argon atmoszférában végezzük el magas hőmérsékleten, az ún. forró injektálás módszerrel. Az illékony vegyszereket egy folyékony nitrogénnel hűtött edényben csapdázzuk. A fenti két eszköz kiegészíti egymást és megteremti a feltételeit az újszerű félvezető nanorészecskék előállításának, felületkémiájuk módosításának, valamint a minták szakszerű tárolásának.



*Schlenk-line szintézisállomás*

### Az eddigi eredményekhez kapcsolódó legfontosabb publikációk:

1. D. Zámbó, D. Kovács, G. Südi, Dr. A. Deák: Surface Modification of Gold Nanoprisms and their Self-assembly with Nanospheres Particle & Particle System Characterization Volume40, Issue3 March 2023, 2200197 <https://doi.org/10.1002/ppsc.202200197>
2. Abuelmagd M. Abdelmonem, Dániel Zámbó, Pascal Rusch, Anja Schlosser, Lars F. Klepzig, and Nadja C. Bigall: Versatile Route for Multifunctional Aerogels Including
3. Flaxseed Mucilage and Nanocrystals Macromol Rapid Commun. 2022 Apr;43(7):e2100794. Epub 2022 Feb 5. <https://doi.org/10.1002/marc.202100794>
4. Gábor Piszter, Krisztián Kertész, Dávid Kovács, Dániel Zámbó, Zsófia Baji, Levente Illés, Gergely Nagy, József Sándor Pap, Zsolt Bálint and László Péter Biró: Spectral Engineering of Hybrid Bioteemplated Photonic/Photocatalytic Nanoarchitectures Nanomaterials 2022, 12, 4490. <https://doi.org/10.3390/nano12244490>
5. "Gábor Holló, Dániel Zámbó, András Deák, Federico Rossi, Raffaele Cucciniello, Pierandrea Lo Nostro, Hideki Nabika, Bilge Baytekin, István Lagzi, and Masaki Itatani: Effect of the Polarity of Solvents on Periodic Precipitation: Formation of Hierarchical Revert Liesegang Patterns J. Phys. Chem. B 2022, 126, 41, 8322–8330, October 11, 2022 <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c05810>
6. Krisztián Kertész, Gábor Piszter, Zsolt Endre Horváth, Dániel Zámbó, András Deák and László Péter Biró: Effect of Plasmonic Au and Ag/Au Nanoparticles and Sodium Citrate on the Optical Properties of Chitin-Based Photonic Nanoarchitectures in Butterfly Wing Scales Photonics 2022, 9, 553. <https://doi.org/10.3390/photonics9080553>
7. Anja Schlosser, Jakob Schlenkrich, Dániel Zámbó, Marina Rosebrock, Rebecca T. Graf, Giamper Escobar Cano, and Nadja C. Bigall: Interparticle Interaction Matters: Charge Carrier Dynamics in Hybrid Semiconductor–Metal Cryoaerogels Advanced Materials Interfaces 2022, Volume 9, Issue 12, 2200055 <https://doi.org/10.1002/admi.202200055>
8. Rebecca T. Graf, Anja Schlosser, Dániel Zámbó, Jakob Schlenkrich, Pascal Rusch, Atasi Chatterjee, Herbert Pfnür, and Nadja C. Bigall: Interparticle Distance Variation in Semiconductor Nanoplatelet Stacks Adv. Funct. Mater. 2022, Volume32, Issue24, 2112621 <https://doi.org/10.1002/adfm.202112621>
9. Gábor Piszter, Krisztián Kertész, Gergely Nagy, Zsófia Baji, Zsolt Endre Horváth, Zsolt Bálint, József Sándor Pap and László Péter Biró: Spectral tuning of bioteemplated ZnO photonic nanoarchitectures for photocatalytic applications R. Soc. Open Sci. 9: July 2022 Volume 9 Issue 7, 220090. <https://doi.org/10.1098/rsos.220090>
10. Pálkás, G. Kálvin, P. Vancsó, K. Kandrai, M. Szendrő, G. Németh, M. Németh, Á. Pekker, J. S. Pap, P. Petrik, K. Kamarás, L. Tapasztó, and P. Nemes-Incze: The composition and structure of the ubiquitous hydrocarbon contamination on van der Waals materials NATURE COMMUNICATIONS, vol. 13, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34641-7>
11. Z. Tajkov, D. Nagy, K. Kandrai, J. Koltai, L. Oroszlany, P. Sule, Z. E. Horvath, P. Vancso, L. Tapasztó, and P. Nemes-Incze, Revealing the topological phase diagram of ZrTe5 using the complex strain fields of microbubbles NPJ COMPUTATIONAL MATERIALS, vol. 8, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00854-z>
12. Tímea Benkó, Shaohua Shen, Miklós Németh, Jinzhan Su, Ákos Szamosvölgyi, Zoltán Kovács, György Sáfrán, Sahir M. Al-Zurairi, Endre Zsolt Horváth, András Sági, Zoltán Kónya, József Sándor Pap: BiVO4 charge transfer control by a water-insoluble iron complex for solar water oxidation Applied Catalysis A: General Volume 652, 25 February 2023, 119035 <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119035>
13. Tímea Benkó, Dávid Lukács, Mingtao Li, József S. Pap: Redox-active ligands in artificial photosynthesis: a review Environmental Chemistry Letters (2022) 20:3657–3695 <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01448-3>
14. Filippo Giannazzo, Salvatore Ethan Panasci, Emanuela Schilirò, Patrick Fiorenza, Giuseppe Greco, Fabrizio Roccaforte, Marco Cannas, Simonpietro Agnello, Antal Koos, Béla Pécz, Marianna Španková, Štefan Chromik: Highly Homogeneous 2D/3D Heterojunction Diodes by Pulsed Laser Deposition of MoS2 on Ion Implantation Doped 4H-SiC Advanced Materials Interfaces Volume10, Issue1 January 5, 2023, 2201502 <https://doi.org/10.1002/admi.202201502>
15. Ana Cadena, Áron Pekker, Bea Botka, Erzsébet Dodony, Zsolt Fogarassy, Béla Pécz, Katalin Kamarás: Encapsulation of the Graphene Nanoribbon Precursor 1,2,4-Trichlorobenzene in Boron Nitride Nanotubes at Room Temperature Phys. Status Solidi RRL 2022, Volume17, Issue1 January 2023, 2200284, <https://doi.org/10.1002/pssr.202200284>



16. E. P. Salvatore, K. Antal, S. Emanuela, D. F. Salvatore, G. Giuseppe, F. Patrick, R. Fabrizio, A. Simonpietro, C. Marco, M. G. Franco, S. Attila, N. Miklos, P. Béla, and G. Filippo, Multiscale Investigation of the Structural, Electrical and Photoluminescence Properties of MoS<sub>2</sub> Obtained by MoO<sub>3</sub> Sulfurization NANOMATERIALS, vol. 12, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12020182>
17. F. Giannazzo, S. E. Panasci, E. Schilirò, F. Roccaforte, A. Koos, M. Nemeth, and B. Pécz, "Esaki Diode Behavior in Highly Uniform MoS<sub>2</sub>/Silicon Carbide Heterojunctions ADVANCED MATERIALS INTERFACES, vol. 9, no. 22, 2022. <https://doi.org/10.1002/admi.202200915>