

Doktori (Ph. D.) értekezés tézisei

Optikailag aktív perovszkit elektródok vizsgálata

Samu Gergely Ferenc

Témavezetők:

Dr. Janáky Csaba
Egyetemi adjunktus

Prof. Visy Csaba
Professor emeritus



KÉMIA DOKTORI ISKOLA
Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék

Szeged

2018

I. Bevezetés és az értekezés célkitűzései

A hibrid szerves-szervetlen perovszkitokat egyre növekvő tudományos érdeklődés övezi, amióta bebizonyosodott, hogy kiemelkedően hatékony napelemek alkotói lehetnek. A perovszkit típusú napelemek hatékonyságában ugrásszerű növekedés figyelhető meg, mely már elérte a 22,1%-os értéket.

Ezen anyagok sokoldalúságukat a perovszkit rácsba beépíthető elemek (vagy éppen molekulák) változatosságának köszönhetik. Ez a széleskörű rácsbeli helyettesíthetőség (ötvözhetőség) az oka annak, hogy számos fizikai sajátságuk finomhangolható. Mindezek mellett, előállításukra egyszerű oldatkémiai eljárások használhatóak (például: *egylépeses*, *kétlépeses*, illetve *vákuumal segített módszerek*). Az utóbbi évek során számos különböző módszer (illetve régebbiek továbbfejlesztése) célozta meg a perovszkitok kristályosodásának precízebb szabályozását.

Ezen perovszkitok optoelektronikai sajátságai széleskörű hangolhatóságot és sokoldalúságot mutatnak. Nagy *extinkciós koeficiensük* és *összetétfüggő tiltottsáv szélességük* ideális fényelnyelő és -emittáló anyagokká teszi őket. Ezen anyagokban a fényelnyelést követően azonnal bekövetkezik a töltésszeparáció (*alacsony exciton kötési energia*), ami hozzájárul a hatékony töltéshordozó generáláshoz. Továbbá elektromos tulajdonságaik rendkívül ellenállóak a hibahelyekkel szemben (*túlnyomórészt alacsony energiaszintű pontszerű hibahelyek*, illetve a *szennyezéssel sávok hiánya*), így bennük a töltéshordozó rekombinációs folyamatok is visszaszorulnak. Az *ambipoláris töltéstranszport* pedig a hatékony töltéshordozó kinyeréshez járul hozzá. Ezek a tulajdonságok együttesen eredményezik a perovszkit napelemek rendkívüli hatékonyságát.

Jelenleg a perovszkit alapú eszközök széleskörű elterjedését, a környezeti hatásokkal (*nedvesség, hő, fény*) szemben mutatott érzékenységük hátráltatja. Ezen felül a belőlük kialakított eszközök működési körülményei (*bennük fellépő elektromos terek*) és a perovszkitok mellett használt anyagok (*kialakított határfelületek, elektród korrózió*) mind hozzájárulhatnak ezen berendezések instabilitásához.

A perovszkit típusú anyagok elektrokémiai módszerekkel történő vizsgálatát, azok érzékenysége miatt, kevesen kísérelték meg. Elszórvan ugyan már találhatóak *Li-ion interkalációval* vagy az *elektrolumineszcencia jelenségével* foglalkozó vizsgálatok, azonban a perovszkitok elektrokémiai stabilitásukat ezekben a közleményekben nem vizsgálták.

A különböző elektrokémiai módszerekkel betekintést nyerhetünk a perovszkitokban a *töltéshordozók kialakulásának* és azok *transzportjának* folyamatába. Csatolt technikák

segítségével pedig a töltéshordozók kialakulásával együtt járó *kémiai átalakulások* is felderíthetőek. Meghatározhatóakká válnak továbbá alapvető optoelektronikai sajátságai ezen anyagoknak (*sávpozíciók, csapdahelyek pozíciója*). Mindezekon felül, az elektrokémiai módszereket különböző szintézisekre is felhasználhatjuk. Perovszkit alapú fotoelektrodokon fény segítségével különböző reakciókat (pl. CO₂ redukció) játszathatunk le, továbbá az elektrokémiai technikák perovszkit alapú napelemek kialakításában is versenyképesek lehetnek. Azonban ahhoz, hogy mindezeket megvalósítsuk szükséges egy átfogó stabilitásvizsgálat, hogy ezen elektrodok degradációját elkerüljük.

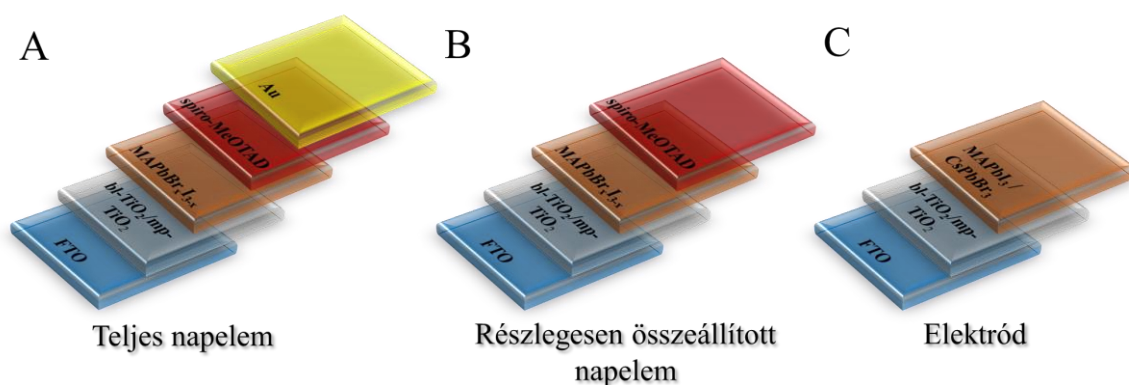
A disszertációm során, így célul tűztem ki, hogy választ találjak az alábbi kérdésekre:

- *Milyen hatása van a hosszú távú megvilágításnak a vegyes halogenid tartalmú perovszkit napelemek hatékonyságára?*
- *Milyen potenciál-tartományon lehet biztonságban elektrokémiai méréseket végezni? Milyen redoxi átalakulásokon esnek át a perovszkit elektrodok?*
- *Milyen hatással van az elektronvezető réteg/perovszkit határfelület minősége a töltéshordozó rekombinációs folyamatokra?*
- *Lehetséges-e elektrokémiai módszerekkel vezető polimer lyukvezető rétegek leválasztása perovszkit típusú elektrodokra? Milyen hatékonyságúak az így nyert n-i-p napelemeket?*

Első lépésként egy olyan oldószer/elektrolit rendszer meghatározását tűztem ki célul, amelyben elektrokémiai vizsgálatokat lehet elvégezni. Ezen kísérletekhez model rendszerül FTO/TiO₂/CsPbBr₃ és FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ rendszereket választottam. Célul tűztem ki, hogy azonosítsam ezen anyagok redoxi átalakulásait, melyek segítségével végül megállapíthassak egy elektrokémiai stabilitási ablakot. Következő lépésként tranziens abszorpciós spektroszkópia és elektrokémiai módszerek csatolásával fényt kívántam deríteni a TiO₂ hordozó szerepére a CsPbBr₃-ban bekövetkező töltésrekombinációs folyamatokra. Mivel az elektrokémiai módszereket preparatív célokra is használhatóak, így poli(3,4-etiléndioxitiofén) (PEDOT) lyukvezető réteg elektrodepozíciójának lehetőségét is megvizsgáltam CH₃NH₃PbI₃ elektrodok felületére. Vizsgálni kívántam a PEDOT réteg vastagságának, oxidációs állapotának hatását az így kialakított n-i-p típusú napelemek hatékonyságára. A napelemek vizsgálatának metodikáját vegyes-halogenid tartalmú perovszkit napelemeken sajátítottam el. Ezen vizsgálatok során a fény indukálta fáziseparáció hatását vizsgáltam a napelemek optikai és elektromos sajátságaira.

II. Kísérleti módszerek

A kísérleti munka során három eltérő architektúrát használtam (**1. Ábra**). A perovszkit napelemek egy fluoriddal adalékolt ón-oxid (FTO) bevonatú üveglapra rétegzett vékony lyukblokkoló TiO_2 rétegből (bl- TiO_2), egy mezopórusos TiO_2 rétegből (mp- TiO_2), egy perovszkit fényelnyelő rétegből, egy lyukvezető spiro-MeOTAD rétegből és végül egy arany kontaktból épültek fel (**1A Ábra**). A fény hatására bekövetkező fázis szeparáció tanulmányozásához hasonló elrendezést alakítottam ki a felső arany kontaktus nélkülözésével (**1B Ábra**). Azért, hogy a napelemekben lejátszódó folyamatokat elektrokémiai módszerekkel követhessem, az elektródok kialakításakor a napelemek architektúráját vettem mintául. Az elektródok esetén további szempont volt, hogy transzmissziós módban is vizsgálhatóak legyenek, ezért vékonyabb perovszkit réteget alakítottam ki (**1C Ábra**).



1. Ábra A kísérletek során használt elrendezések sematikus ábrája. **A:** Teljes napelem, **B:** részlegesen kialakított napelem, **C:** elektród.

Az elektrokémiai méréseket egy Gamry potenciosztát segítségével hajtottam végre háromelektrodos elrendezésben. Ebben az FTO/ TiO_2 /perovszkit elektród szolgált munkaelektrodként és egy Pt háló (1 cm^2) ellenelektrodként (melyet „Piranha-oldattal”, vízzel majd pedig diklórmétánnal tisztítottam). Referenciaelektrodként egy Ag/AgCl kvázireferenciát használtam. Mérések előtt és után a ferrocén/ferrocénium redoxi rendszer formálpotenciáljának meghatározásával (0.01 M ferrocén, 0.1 M Bu_4NPF_6 , diklórmétánban) kalibráltam a referencia elektródot, mely $E = +0.45 \pm 0.04 \text{ V vs. Ag/AgCl}$ értéknek adódott. Az elektrokémiai cella összeállítását minden esetben kesztyűs manipulátorban végeztem (N_2 atmoszféra, $\text{H}_2\text{O} < 0.1 \text{ ppm}$, $\text{O}_2 < 0.1 \text{ ppm}$), majd pedig a cellát hermetikusan lezártam, hogy inert körülményeket biztosítsak. Az elektródok stabilitási tartományát meghatározásához spektroelektrokémiai méréseket végeztem. Az elektrokémiai cellát egy fotométerbe (Varian Cary 50 Bio) helyezve,

ciklikus voltammetriás mérések közben folyamatosan felvettem az elektródok UV-látható spektrumát. Az oxidációs és redukciós ciklusok vizsgálatokor minden esetben új elektródokat használtam. A voltammogramokon megjelenő redoxi folyamatok és az elektródok abszorbanciaváltozásából következtettem azok elektrokémiai stabilitási ablakára.

PEDOT lyukvezető réteg elektrodepozícióját FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ elektródokra 0.01 M bis-EDOT és 0.1 M Bu₄NPF₆ tartalmú diklórmetán elektrolitból hajtottam végre. A polimerizációs potenciál meghatározását és a PEDOT réteg növekedését spektroelektrokémia segítségével potenciodynamikus módszerekkel vizsgáltam. A PEDOT réteg vastagságának szabályozását potenciosztatikus körülmények között végeztem, ahol az áthaladt polimerizációs töltéssűrűséget szabályoztam. Azért, hogy az elektrokémiai kettősréteg feltöltéséből/kisütéséből eredő töltés hozzájárulását a polimerizációs töltéshez kizárjam, egy előkezelési lépést iktattam be a polimerizációt megelőzően, mely során az elektródokat E = +0.5 V állandó potenciálon tartottam 60 másodpercig. Az utókezelt napelemek esetében három különböző utókezelési módszert vizsgáltam, melyeket a polimerizációt követően hajtottam végre.

Az ultragyors spektroelektrokémiai mérések elvégzéséhez egy Clark MXR-2010 lézerrendszert használtam (775 nm, 1 mJ/pulzus, FWHM=150 fs, 1 kHz ismétlési frekvencia). A fő lézernyaláb 95/5 intenzitás arányban volt kettéosztva. A nagyobb intenzitású nyalábból frekvenciaduplázással alakítottuk ki a 387 nm-es pumpa nyalábot. A kisebb intenzitású nyalábból pedig CaF₂ kristály segítségével történt a spektrumfelvételhez használt fehér fény kialakítása (próba impulzus). Azért, hogy a méréseink során a töltéshordozók mennyisége azonos legyen, a gerjesztő pumpa impulzus intenzitását úgy állítottuk be, hogy a maximális abszorbancia változás mértéke állandó maradjon a mérések során ($\Delta A_{520\text{nm}} \sim -0.25$). Ez $\sim 12 \mu\text{J cm}^{-2}$ gerjesztési intenzitásnak felelt meg. Ezután a vizsgálni kívánt elektródot egy háromnyakú elektrokémiai cellában a pumpa és próba térbeli fedési pontjába helyeztem. Az elektródot állandó potenciálon tartva történt a tranziens abszorpciós spektrumok felvétele. A mérési pontot minden mérés között friss elektród felületre mozdítottam, hogy a rétegek degradációját elkerüljem.

A vegyes halogenidtartalmú perovszkit típusú napelemek esetén a fázisszeperáció előidézéséhez 100 mW cm^{-2} beeső intenzitású megvilágítást használtam 30 percig. Ehhez egy Xe-lámpa fényét használtam, mely elé egy AM 1.5 szűrőt helyeztem. Ahhoz, hogy a megvilágítással társuló hő hatására bekövetkező folyamatokat kizárjam a napelemek elé egy vízzel megtöltött szűrőt is helyeztem. A fény besugárzás után a napelemeket a sötétbe helyezve,

követtem azokban a visszalakulás során azok optikai és elektromos tulajdonságaiban bekövetkező változásokat.

Röntgen fotoelektron spektroszkópiás (XPS) vizsgálatokat egy PHI VersaProbe II rendszer segítségével végeztem. A kötési energia skálát minden esetben a C 1s fő komponensének 284.8 eV értékre történő állításával kalibráltuk.

Felsőnézeti és oldalnézeti pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételeket egy a FEI Helios NanoLab™ DualBeam™ műszer segítségével vettük fel.

A röntgen diffrakciós mérések (XRD) egy Bruker D8 DISCOVER műszerrel történtek Cu K α röntgenforrással ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), a 20–80 ° terjedő tartományban, 2 ° min⁻¹ pásztázási sebességgel.

Raman spektroszkópiás vizsgálatokat egy DXR Raman Mikroszkóp segítségével történtek zöld lézerrel ($\lambda = 532 \text{ nm}$), 10 mW teljesítmény mellett szobahőmérsékleten.

A napelemek vizsgálatát két elektródos elrendezésben végeztem egy Princeton Applied Research PARStat 2273 potenciosztát segítségével 100 mW cm⁻² megvilágítás mellett. 50 mV s⁻¹ pásztázási sebesség mellett.

A beeső foton töltéshordozó konverziós hatékonyság (IPCE) meghatározását egy Newport Oriel Quantum Efficiency Measurement System segítségével hajtottam végre.

III. Új tudományos eredmények tézisszerű bemutatása

T1 Meghatároztam két optikailag aktív perovszkit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ és CsPbBr_3) esetén azok elektrokémiai stabilitási tartományát spektroelektroómiái mérések segítségével.

Az elektrokémiai mérések elvégzéséhez Bu_4NPF_6 /dikórmetán elektrolit bizonyult megfelelőnek, mivel 2 óra elteltével sem tapasztaltam a perovszkit rétegek számottevő degradációját. Spektroelektrokémiai vizsgálatok segítségével meghatároztam a rétegek degradációjához rendelhető redoxi események potenciálértékét, melyekhez az elektródok abszorbancia változása is társítottam. Végül a CsPbBr_3 rétegek esetén a $-1.0 \text{ V} - +0.6 \text{ V}$ vs. Ag/AgCl , míg a $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ rétegek esetén a $-0.65 \text{ V} - +0.55 \text{ V}$ vs. Ag/AgCl stabilitási ablakot állapítottam meg.

T2 Azonosítottam az FTO/ TiO_2 / CsPbBr_3 elektródok esetén az elektrokémiai stabilitási ablakukon kívül eső redoxi eseményeket.

Az elektródok oxidációja során azok felületén CsPF_6 képződését XPS és XRD vizsgálatok segítségével bizonyítottam. Ez a degradációs folyamat a rétegek morfológiájának átalakulásával együttesen játszódott le. SEM felvételeken a rétegek leoldódása mellett (Pb^{2+} és Br^- formájában) ugyanis téglatest alakú részecskék megjelenését is tapasztaltam. Az elektródok redukciója során pedig fém ólom megjelenését tapasztaltam, mely a levegő oxigénjének hatására azonnal részlegesen PbO -á alakult (a cellából való eltávolítás után). A degradációs folyamat olyan mértékű volt, hogy a perovszkit réteg alatti TiO_2 alapréteg is láthatóvá vált. Az elektród bizonyos területein továbbá dendritszerű struktúrák megjelenését is tapasztaltam.

T3 Megvalósítottam elektrokémiai és tranziens abszorpciós technikák kombinálását. Ezen kombinált technika segítségével megvizsgáltam a külső elektromos tér hatását FTO/ TiO_2 / CsPbBr_3 elektródok esetén a töltéshordozó rekombinációs folyamat kinetikájára.

FTO/ TiO_2 / CsPbBr_3 elektródok esetén a töltéshordozó rekombinációs folyamat sebességi együtthatója kis változást mutatott 0.0 V vs. Ag/AgCl és ennél negatívabb potenciálok esetén. Ezzel szemben a folyamat kinetikájának felgyorsulását tapasztaltam ennél pozitívabb potenciálok alkalmazásakor. Pozitív potenciál használata esetén ugyanis, a TiO_2 alapréteg elszegényedik elektronokban, ezért a CsPbBr_3 rétegben generált töltéshordozók számára egy új út nyílik meg. Ez a töltésinjektálási folyamat a TiO_2 réteg irányába, verseng a rekombinációs folyamattal, ezért gyorsabb visszaállását tapasztaltam az excitonokhoz rendelhető elnyelésnek.

T4 Tranziens spektroelektrokémiai vizsgálatok során bebizonyítottam, hogy CsPbBr₃ elektródok esetén a TiO₂ szubsztrát hatással van a töltéshordozó rekombinációs folyamat kinetikájára.

FTO/CsPbBr₃ (TiO₂ alapréteg nélkül) elektródok esetén nem volt hatással az alkalmazott elektrokémiai potenciál az excitonokhoz rendelhető elnyelés visszaalakulására (legalábbis az általam vizsgált időtartományban).

T5 A fény hatására bekövetkező fázisszeparáció hatással van a vegyes halogenidtartalmú perovszkit napelemek optikai és elektromos sajátságaira.

30 perc fehér fénnel történő megvilágítás után a CH₃NH₃PbBr_{1.5}I_{1.5} napelemek fényelnyelésében 620 nm-nél csökkenést tapasztaltam. Ez a folyamat a vegyes halogenid-tartalmú perovszkit fázis mennyiségének csökkenésével magyarázható. Ezzel egyidőben, rövidebb és hosszabb hullámhosszakon egyaránt a fényelnyelés növekedését figyeltem meg, mely a bromid- és jodid-gazdag fázisok megjelenését bizonyította. Ez a fázisszeparációs folyamat hatással volt a napelemek IPCE görbéjére is. A szeparációt követően ugyanis 50 % csökkenést tapasztaltunk az IPCE értékekben, mely a fázisszeparáción átesett napelemek hatékonyságában is megmutatkozott.

T6 A fázisszeparációs folyamat visszafordíthatónak bizonyult, amennyiben a napelemeket sötétben tároltuk. Azonban az optikai és elektromos sajátságok visszaalakulása más időskálán következtek be.

A napelemek optikai sajátságainak visszaalakulása 3 óra alatt lejátszódott. Azonban az IPCE értékek visszaállása egy sokkal időigényesebb folyamat, mely akár 36 órát is igénybe vett. Az elektromos sajátságok lassabb visszaalakulásából az a következtetés vonható le, hogy a töltéshordozók kinyerése válik gátolttá a fázisszeparáción átesett napelemekben, amely a perovszkit rétegekben kialakuló csapdahelyek lassú eltűnésével magyarázható.

T7 Elektrokémiai polimerizáció segítségével sikeresen választottam le poli(3,4-etiléndioxitiofén) lyukvezető réteget CH₃NH₃PbI₃ elektródok felületére, ezáltal kialakítva egy *n-i-p* típusú napelemet.

PEDOT elektrokémiai leválasztáshoz bis-EDOT monomert használtam, hogy elkerüljem a CH₃NH₃PbI₃ elektródok degradációját. Ezután potenciosztatikus leválasztás alkalmazásával sikeresen szabályoztam a leváló PEDOT rétegek vastagságát az áthaladó töltéssűrűség segítségével.

T8 A leválasztott lyukvezető réteg sajátosságai (vastagság, oxidációs állapot) befolyásolták a kialakított napelemek hatékonyságát.

A hatékonyság növelése érdekében elektrokémiai utókezeléseknek vettem alá az előállított napelemeket. A PEDOT rétegek redukciója során a növekedést értem el azok nyitott áramköri feszültség értékeiben. Ez az utóredukciós lépés azonban a $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ rétegek nem kívánt degradációjával járt együtt. Ezért három enyhébb utóredukciós kezelést vizsgáltam meg, melyek eredményeképp a bajnok napelem 5.9 %-os hatékonysággal bírt. Ezek után femtoszekundumos tranziens abszorpciós spektroszkópia segítségével megállapítottam, hogy a PEDOT réteg képes hatékony lyukvezető anyagként funkcionálni.

IV. Tudományos közlemények

Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) azonosító: 10040508

Google Tudós hivatkozás: <https://scholar.google.hu/citations?user=aIPTi40AAAAJ&hl=hu>

Az értekezéshez kapcsolódó tudományos közlemények

Könyvfejezetek:

- [1] **G. F. Samu**, C. Janáky
Tailoring the interfaces in conducting polymer composites by controlled polymerization in V. K. Thakur, M. K. Thakur, R. K. Gupta
Hybrid Polymer Composite Materials: Structure and Chemistry (Chapter 5, 101-127), Woodhead Publishing, Elsevier, 2017

Közlemények:

- [1] **G. F. Samu**, C. Janáky, P. V. Kamat
A Victim of Halide Ion Segregation. How Light Soaking Affects Solar Cell Performance of Mixed Halide Lead Perovskites
ACS Energy Letters, 2, 1860-1861 (2017)
IF₂₀₁₇ = NA
- [2] R. A Scheidt, **G. F. Samu**, C. Janáky, P. V. Kamat
Modulation of Charge Recombination in CsPbBr₃ Perovskite Films with Electrochemical Bias
Journal of American Chemical Society, 140, 86-89 (2018)
IF₂₀₁₇ = 13.858
- [3] **G. F. Samu**, R. A Scheidt, P. V. Kamat, C. Janáky
Electrochemistry and Spectroelectrochemistry of Lead Halide Perovskite Films: Materials Science Aspects and Boundary Conditions
Chemistry of Materials, 30, 561–569 (2018) – **Az újság címlapborítója**
IF₂₀₁₇ = 9.466
- [4] **G. F. Samu**, R. A Scheidt, G. Zaiats, P. V. Kamat, C. Janáky
Electrodeposition of Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Hole-transporter on Methylammonium Lead Iodide Layers: a New Tool to Assemble Perovskite Solar Cells
ACS Energy Letters, submitted for publication
IF₂₀₁₇ = NA

ΣIF = 23.324

Az értekezés témájához nem kapcsolódó, nemzetközi folyóiratban megjelent tudományos közlemények:

- [5] P. S. Tóth, **G. F. Samu**, B. Endrődi, C. Visy
Hyphenated in situ conductance and spectroelectrochemical studies of polyaniline films in strongly acidic solutions
Electrochimica Acta, 110, 446-451 (2013)
IF₂₀₁₃ = 4.086
- [6] Á. Veres, J. Ménesi, C. Janáky, **G. F. Samu**, M. K. Scheyer, Q. Xu, F. Salahioglu, M. V. Garland, I. Dékány, Z. Zhong
New insights into the relationship between structure and photocatalytic properties of TiO₂ catalysts
RSC Advances, 5, 2421-2428 (2015)
IF₂₀₁₅ = 3.289
- [7] **G. F. Samu**, C. Visy, K. Rajeshwar, S. Sarker, V. (Ravi) Subramanian, C. Janáky
Photoelectrochemical Infiltration of a Conducting Polymer (PEDOT) into Metal-Chalcogenide Decorated TiO₂ Nanotube Arrays
Electrochimica Acta, 151, 467-476 (2015)
IF₂₀₁₅ = 4.803
- [8] **G. F. Samu**, K. Pencz, C. Janáky, K. Rajeshwar
On the electrochemical synthesis and charge storage properties of WO₃/polyaniline hybrid nanostructures
Journal of Solid State Electrochemistry, 9, 2741-2751 (2015)
IF₂₀₁₅ = 2.327
- [9] Thomas, C. Janáky, **G. F. Samu**, M. N. Huda, P. Sarker, J. P. Liu, V. Nguyen, E. H. Wang, K. A. Schug, K. Rajeshwar
Time- and Energy-Efficient Solution Combustion Synthesis of Binary Metal Tungstate Nanoparticles with Enhanced Photocatalytic Activity
ChemSusChem, 10, 1652-1663 (2015)
IF₂₀₁₅ = 7.116
- [10] B. Endrődi, **G. F. Samu**, D. Fejes, Z. Németh, E. Horváth, A. Pisoni, P. K. Matus, K. Hernádi, C. Visy, L. Forró, C. Janáky
Challenges and rewards of the electrosynthesis of macroscopic aligned carbon nanotube array/conducting polymer hybrid assemblies – Az újság belső borítóján szerepel
Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 53, 1507–1518 (2015)
IF₂₀₁₅ = 3.318
- [11] B. Endrődi, **G. F. Samu**, M. A. Azam, C. Janáky, C. Visy
Electrochemical synthesis and characterization of poly(3-hexylthiophene)/single-walled carbon nanotube array hybrid materials
Journal of Solid State Electrochemistry, 11, 3179–3187 (2016)
IF₂₀₁₆ = 2.316

- [12] **G. F. Samu**, Á. Veres, S. P. Tallósy, L. Janovák, I. Dékány, A. Yepez, R. Luque, C. Janáky
Photocatalytic, photoelectrochemical, and antibacterial activity of benign-by-design mechanochemically synthesized metal oxide nanomaterials
 Catalysis Today, 284, 3-10 (2017)
IF₂₀₁₆ = 4.636
- [13] E. Varga, K. Baán, **G. F. Samu**, A. Erdőhelyi, A. Oszkó, Z. Kónya, J. Kiss
The Effect of Rh on the Interaction of Co with Al₂O₃ and CeO₂ Supports
 Catalysis Letters, 9, 1800-1807 (2016)
IF_{2015/2016} = 2.799
- [14] **G. F. Samu**, Á. Veres, B. Endrődi, E. Varga, K. Rajeshwar, C. Janáky
Bandgap-engineered Quaternary M_xBi_{2-x}Ti₂O₇ (M: Fe, Mn) Semiconductor Nanoparticles: Solution Combustion Synthesis, Characterization, and Photocatalysis
 Applied Catalysis B: Environmental, 208, 148-160 (2017)
IF₂₀₁₆ = 9.446
- [15] M. K. Hossain, **G. F. Samu**, K. Gandha, S. Santhanagopalan, J. P. Liu, C. Janáky, K. Rajeshwar
Solution Combustion Synthesis, Characterization, and Photocatalytic Activity of CuBi₂O₄ and its Nanocomposites with CuO and α-Bi₂O₃
 Journal of Physical Chemistry C, 121, 8252-8261 (2017)
IF₂₀₁₆ = 4.536
- [16] Sági, A. Varga, **G. F. Samu**, D. Dobó, K. L. Juhász, B. Takács, E. Varga, Á. Kukovecz, Z. Kónya, C. Janáky
Photoelectrochemistry by Design: Tailoring the Nanoscale Structure of Pt/NiO Composites Leads to Enhanced Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Performance – Az újság címlapborítója
 Journal of Physical Chemistry C, 121, 12148–12158 (2017)
IF₂₀₁₆ = 4.536
- [17] D. Roy, **G. F. Samu**, M. K. Hossain, C. Janáky, K. Rajeshwar
On the measured optical bandgap values of inorganic oxide semiconductors for solar fuels generation
 Catalysis Today, 300, 136-144 (2018)
IF₂₀₁₆ = 4.636
- [18] A. Varga, **G. F. Samu**, C. Janáky
Rapid Synthesis of Interconnected CuCrO₂ Nanostructures: A Promising Electrode Material for Photoelectrochemical Fuel Generation
 Electrochimica Acta, Submitted for Publication

ΣΣIF = 81.168

Részvétel nemzetközi konferencián

Poszter prezentációk:

- [1] **G. F. Samu**, C. Visy, K. Rajeshwar, C. Janáky
Photoelectrodeposition of conducting polymers onto inorganic semiconductor nanoarchitectures
10th International Workshop on Electrodeposited Nanostructures (EDNANO10)
2014. Március 20-24, Oberwesel, Németország
- [2] **G. F. Samu**, C. Visy, K. Rajeshwar, C. Janáky
Mechanistic aspects of the photoelectrochemical polymerization of 3,4-ethylene-dioxythiophenes
22th International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals
2014. Június 30 – Július 5, Turku, Finnország
- [3] **G. F. Samu**, C. Visy, K. Rajeshwar, C. Janáky
Photoelectrosynthesis of Hybrid Nanostructured Materials
6th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN6)
2014. Október 15-18, Szeged, Magyarország
- [4] **G. F. Samu**, K. Pencz, K. Rajeshwar, C. Janáky
Electrochemical synthesis of WO₃/Pani hybrid materials and the evaluation of their charge storage properties
Workshop on the Electrochemistry of Electroactive Materials (WEEM 2015)
2015. Május 31 – Június 5, Bad Herrenalb, Németország
- [5] **G. F. Samu**, K. Rajeshwar, C. Janáky
Solution Combustion Synthesis of Bi₂Ti₂O₇ and Parallel Bandgap Engineering through Foreign Ion Incorporation
7th Forum on New Materials (CIMTEC 2016)
2016. Június 5-9, Perugia, Olaszország
- [6] **G. F. Samu**, A. Thomas, Á. Veres, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky
Solution Combustion Synthesis of Metal Oxide Semiconductors for Photocatalytic Environmental Remediation
9th European meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications (SPEA)
2016. Június 13-17, Strasbourg, Franciaország

Előadások:

- [1] **G. F. Samu**, A. Thomas, Á. Veres, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky
Solution Combustion Synthesis of Metal Oxide Semiconductors for Photocatalytic Environmental Remediation – Gyorsbemutató
9th European meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications (SPEA)
2016. Június 13-17, Strasbourg, Franciaország

- [2] **G. F. Samu**, K. Rajeshwar, C. Janáky
Bandgap engineering of Bi₂Ti₂O₇ through foreign ion incorporation via solution combustion synthesis
 253rd ACS National Meeting
 2017. Április 02-06, San Francisco, USA
- [3] **G. F. Samu**, S. Sarker, V. Subramanian, C. Visy, K. Rajeshwar, C. Janáky
Photoelectrochemical synthesis of conducting polymer/inorganic semiconductor assemblies
 21st Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry
 2017. Április 23-26, Szeged, Magyarország

Nemzetközi konferencián szereplés társszerzőként

Poszter prezentációk:

- [1] B. Endrődi, **G. F. Samu**, D. Fejes, Z. Németh, C. Janáky, K. Hernádi, L. Forró, C. Visy
Thermoelectric and supercapacitive properties of self-standing highly-ordered conducting polymer/carbon nanotube structures
 ChemOnTubes
 2014. Március 30 - Április 3, Riva del Garda, Olaszország
- [2] B. Endrődi, **G. F. Samu**, D. Fejes, Z. Németh, C. Janáky, K. Hernádi, L. Forró, C. Visy
Electrosynthesis of macroscopic MWCNT array – conducting polymer hybrids: all-carbon nanoarchitectures for energy applications
 22th International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals
 2014. Június 30 – Július 5, Turku, Finnország
- [3] Á. Veres, J. Ménesi, C. Janáky, **G. F. Samu**, M. K. Scheyer, Q. Xu, F. Salahioglu, M. V. Garland, I. Dékány, Z. Zhong
Various TiO₂ Nanostructures Derived from Acidic Hydrothermal Treatment of Hydrogen Titanate Nanofibres: Structural Characterisation and Photocatalytic Property
 6th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN6)
 2014. Október 15-18, Szeged, Magyarország
- [4] A. Varga, **G. F. Samu**, C. Janáky
Synthesis and characterization of CuCrO₂ for CO₂ reduction
 5th International Conference from Nanoparticles and Nanomaterials to Nanodevices and Nanosystems (IC4N)
 2016. Június 26-30, Porto Heli Peloponnese, Görögország
- [5] A. Varga, **G. F. Samu**, C. Janáky
Solution combustion synthesis of CuCrO₂ and application for CO₂ reduction
 21st Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry
 2017. Április 23-26, Szeged, Magyarország

Előadások:

- [1] **B. Endrődi**, E. Kriván, M.A. Azam, **G. F. Samu**, A. Varga, C. Visy
Thermoelectric and Electrochemical Properties of Highly Ordered Conducting Polymer/Carbon Nanotube Structures
7th International Workshop on the Electrochemistry of Electroactive Materials
2012. Június 3-8. Hódmezővásárhely, Magyarország
- [2] **C. Janáky**, **G. F. Samu**, K. Rajeshwar
Electrosynthesis of Quantum Dot-Sensitized Solid-State Solar Cells
247th ACS National Meeting
2014. Március 16-20, Dallas, USA
- [3] **G. F. Samu**, K. Rajeshwar, **C. Janáky**
In situ Photo-Electrosynthesis of Conducting Polymers as Hole Transporters in Perovskite-Sensitized Solid-State Solar Cells
22th International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals
2014. Június 30 – Július 5, Turku, Finnország
- [4] **C. Janáky**, **K. Rajeshwar**, **G. F. Samu**
(Photo)Electrochemically Prepared Organic/Inorganic Hybrid Assemblies for Energy Conversion and Storage
227th ECS Meeting
2015. Május 24-28, Chicago, USA

V. Nyilatkozat

A disszertációhoz felhasznált közlemények hazai levelező szerzőjeként nyilatkozom, hogy **Samu Gergely Ferenc** hozzájárulása mind a négy közlemény és egy könyvfejezet esetében meghatározó volt, amelyet jelez a négy elsőszerzőség és az egy megosztott első szerzős közlemény. A disszertációhoz felhasznált közleményeknek nincs doktori fokozattal nem rendelkező magyar társszerzője.

Szeged, 2018.03.05

.....

Dr. Janáky Csaba