

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Kecsenovity Egon

**Nanokompozit elektródok fotoelektrokémiai
tulajdonságainak vizsgálata**

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Janáky Csaba

egyetemi docens



Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék
Kémia Doktori Iskola

2022

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A XXI. század egyik nagy kihívása, hogy egyre inkább környezetbarát energiaforrásokat használjunk a jelenleg elterjedt, nem megújuló források helyett. A legnagyobb, számunkra elérhető megújuló energiaforrás a napfény, melynek hasznosítására ad egy lehetséges megoldást az elmúlt 50 évben egyre inkább kutatott fotoelektrokémia tudományterülete.

A fotoelektródok többféleképp tudják hasznosítani a napfény energiáját: egyrészt képesek átalakítani a fényt elektromos energiává, vagy megkötni azt kémiai energia formájában. Utóbbi stratégiát követi a fotoelektrokémiai (photoelectrochemical, PEC) hidrogén előállítás vízből, vagy a szén-dioxid gáz PEC redukciója hasznos vegyületekké. További lehetséges alkalmazási módja ezen PEC módszereknek a környezeti szennyezők ártalmatlanítása, melynek során káros ionokat, például nehézfémeket távolítunk el a szennyezett vizekből vagy veszélyes szerves anyagokat alakítunk át kevésbé ártalmassá.

Egy jól működő fotoelektródnak több követelménynek kell megfelelnie egyidejűleg: stabilnak kell lennie, oldhatatlannak a vizsgált közegben, ellenállónak a fotokorrózióval szemben, miközben széles optikai elnyelési tartománnyal (kis tiltottsáv-szélesség) kell rendelkeznie és egyben jó töltésszétválasztási és töltésátviteli tulajdonságokat is kell mutatnia. Azonban – jelenlegi legjobb tudásunk szerint – egyetlen anyag sem felel meg ezeknek a kritériumoknak. Emiatt a tudományos figyelem egyre inkább az olyan kompozit anyagok felé terelődött, amelyek több komponensből állnak össze, és ahol minden komponensnek megvan a maga feladata (fényelnyelés, töltéshordozó transzport és katalitikus aktivitás). Egy hatékony kompozit fotoelektród tervezése és készítése azonban nehéz és komoly feladat – és ennek is köszönhetően vált ez a tématerület a fotoelektrokémia egyik vezető kutatási irányává.

Bármely kompozit vagy hibrid anyag készítésének egyik központi célja, hogy a szintézis során kapott anyag viselkedése jobb legyen, mint az azt felépítő alkotóelemeknél tapasztaltak. Ebben a tekintetben a szén-nanoanyagok egyedülálló tulajdonságokkal rendelkeznek (nagy felület, nagy elektromos vezetőképesség, mechanikai robusztusság stb.), amely vonzó jelöltté teszi őket különböző szervesetlen félvezetőkkel történő párosításhoz és kompozit képzéshez.

2016-ban, doktori tanulmányaim kezdetén az első kitűzött célunk volt **előállítani olyan félvezető/nanoszén fotoelektródokat elektrokémiai leválasztás segítségével, amelyekben a várható töltéshordozó transzport tulajdonságainak javulása mellett tanulmányozhatjuk azok alapvető PEC viselkedését és a CO₂ gáz PEC redukciójában történő alkalmazását.** Az idő és a kutatás előrehaladtával azonban új problémákra és lehetőségekre derült fény, és

ezzel fokozatosan világosabbá váltak azok a célok, amiket a doktori munkám során el akartunk érni. Ezek a célok a következő pontok szerint sorolhatók fel:

- Egy **ilyen elektrokémiai leválasztási módszert találni**, amellyel p-típusú Cu_2O növeszthető különböző nanoszén elektród felületen, mint például spray-coating technikával készült szén nanocső hálón és grafén filmen, valamint 3D grafén habon, így képezve Cu_2O /nanoszén kompozit fotoelektródokat a CO_2 PEC redukciójához. Továbbá célul tűztük ki, hogy megértsük, **mi áll a Cu_2O -hoz képest javuló PEC viselkedés mögött** a nanoszén tartalmú kompozit fotoelektródok esetében.
- Egy másik cél volt, hogy létrehozzunk n-típusú félvezetőt tartalmazó nanoszén alapú fotoelektródokat. Ehhez először a tudományos világban jól ismert TiO_2 -ot választottuk, ehhez viszont olyan egyszerű elektrokémiai módszert kellett találnunk, amivel létrehozhatunk nanokristályos TiO_2 filmet a grafén hordozó felületén. Mivel ilyet nem találtunk a szakirodalomban (főleg nem olyat, amiben nincs további hőkezelési lépés), igyekeztünk az előnyünkre fordítani ezt a kihívást, és egy új célként kitűztük **egy olyan elektrokémiai leválasztási módszer kifejlesztését és vizsgálatát, amivel egyszerűen, jól szabályozottan és egy lépésben lehetséges nanokristályos TiO_2 filmet létrehozni akár nanoszén alapú hordozón is, kialakítva így a kívánt kompozit fotoelektródokat.**
- Szerettünk volna egy olyan n-típusú félvezetővel dolgozni, amely PEC viselkedése javul amikor nanoszánnal kombinálva hozunk belőle létre fotoelektródokat. A kiválasztott félvezető a **hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)** lett, és az elsődleges **cél volt elektrokémiai leválasztás segítségével létrehozni belőle grafén alapú nanokompozitot.** További célként tűztük ki a javuló PEC viselkedés mögötti háttér felderítését és a tapasztalt, **fotooxidáció miatt fellépő grafén réteg korróziójának megakadályozását** egy ko-katalizátor réteg létrehozásával.
- A szakirodalomban található ellenmondás feloldása érdekében elkezdtek vizsgálni a nem nanoszén alapú CuI-PbI_2 rendszert, nitrátió PEC redukciójában. Elsődleges célként ki szerettünk volna deríteni, hogy **létezik-e a kétfémes vegyület, vagy csak keveréket képez ez a két jodid.** Ehhez továbbá **találnunk kellett egy szintézismódszert**, amivel létrehozhattunk ebből a vegyes jodid rendszerből használható fotoelektródokat. További cél volt megválaszolni, **miért viselkedik jobban a nitrátió PEC redukciójában a kialakult keverék jodid**, mint a CuI és PbI_2 magában, és hogy **milyen termékek keletkeznek** eme redukciós folyamatok során.

2. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK ÉS ELJÁRÁSOK

A szén nanocső, és a grafén szuszpenziókat spray-coating technikával vittük fel az előmelegített indiummal adalékolt ón-oxid bevonatú üveg (indium doped tin oxide-coated glass - ITO) vagy a fluorral adalékolt ón-oxid bevonatú üveg (fluorine doped tin oxide-coated glass - FTO) vagy üvegszén (glassy carbon - GC) elektródfelületre, egy Alder AD320 típusú airbrush és egy házi készítésű spray-coater robot segítségével, ahol az alkalmazott gáznyomás 0,5 bar volt. A fűzési ciklusokkal tudtuk szabályozni a rétegek vastagságát, és kezdetben a felfűjt rétegek pontos tömegét egy Stanford Research System QCM-200 típusú kvarc mikromérleggel (quartz crystal microbalance - QCM) határoztuk meg. Később (a TiO_2 és a Fe_2O_3 alapú fotoelektródok esetében) egy Mettler Toledo XPE-26 típusú analitikai mikromérleget használtunk erre a célra. A 3D grafén mintákat kétoldalú ragasztóval rögzítettük egy hordozó üveg felületére, és grafit tartalmú ragasztó segítségével alakítottuk ki az elektromos kontaktust, így ezen keresztül használni tudtuk, mint munkaelektrodot.

Különböző összetételű CuI és PbI_2 tartalmú szuszpenziókat készítettünk ultrahangos homogenizálással etanolban. Az így kapott szuszpenziót a már előzőleg említett spray-coating technikával vittük fel egy előmelegített FTO üveg felületére, ahol a felvitt tömeget a Mettler Toledo XPE-26 típusú analitikai mikromérleggel mértük meg. Az FTO üvegre felvitt keveréket 5 percre $400\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű Ar atmoszférába helyeztük, ahol a keverék megolvadt, majd kihűlve egy kompakt filmréteget alkotott (ez egy általunk kifejlesztett vékony film olvasztási eljárás ezekhez a keverék jodidokhoz).

Az elektrokémiai leválasztás minden esetben egy fűtött köpennyel rendelkező kétélektrodes cellában történt (a két térrész egy Nafion 117[®]-es membránnal volt elválasztva) anódos vagy katódos leválasztási elrendezésben, attól függően, melyik anyaggal dolgoztunk. Ezen szintéziseket egy Autolab PGSTAT302-es potenciosztát/galvanosztát segítségével végeztük el, hagyományos három elektródos elrendezésben, ahol a munkaelektrod mellett (ahol a fém-oxidok leválasztása történt) egy $\text{Ag}/\text{AgCl}/3\text{M NaCl}$ referencia elektródot, és egy megfelelő méretű Pt lemezt használtunk ellenelektrodnak.

A lineáris fotovoltammetriás méréseket egy saját tervezésű zárt, egyelektrodes, kvarcablakkal ellátott üveg cellában végeztük adott gázzal történő átbuborékolás után. A munkaelektrod felülete minden esetben vagy a megfelelő félvezetővel, vagy a nanokompozittal volt beborítva. Ellenelektrodként Pt lemezt, míg referencia elektródként $\text{Ag}/\text{AgCl}/3\text{M NaCl}$ elektródot alkalmaztunk. Méréseink során két fényforrást használtunk:

- Newport LCS-100 típusú *napfény szimulátor*, maximális teljesítménnyel működtetve. A fényforrást a munkaelektrod felületétől 5 cm és 18 cm távolságra helyeztük el (5 nap fényintenzitásának megfelelő 500 mW cm^{-2} fluxus a CuI-PbI₂ nanokompozitok, és 1 nap fényintenzitásának megfelelő 100 mW cm^{-2} teljesítményfluxus a Cu₂O/nanoszén és Fe₂O₃/nanoszén kompozitok esetében), melyet a cellán lévő kvarc ablakon keresztül világítottunk meg.
- Hamamatsu L8251 300W Hg-Xe lámpa. A fényforrást a munkaelektrod felületétől 5 cm távolságra helyeztük el (180 mW cm^{-2} fluxus), melyet ugyancsak a cellán lévő kvarc ablakon keresztül világítottunk meg.

Az IPCE méréseket egy Newport Quantum Efficiency Measurement System készülékkel végeztük egy jól zárt, egyterű, három elektrodos kvarc cellában, ahol 3D nyomtatással készítettünk hozzá olyan tetőt, amiben az elektrodok mindig fix pozícióban álltak.

A minták elektrokémiai impedancia spektrumait 10 Hz-től 100 kHz-es frekvencia tartományban vettük fel, szinuszos gerjesztési jelet használva (10 mV RMS amplitudó). A spektrumok modulus-súlyozott illesztését az Autolab potenciosztát Nova szoftvercsomagja segítségével végeztük.

A hosszú távú fotoelektrokémiai méréseket egy kétterű, zárt, kvarc ablakkal ellátott cellában végeztük, ahol a két cellateret Nafion 117[®] membránnal választottuk el. A reakció során a gáz mintavételt on-line rendszerrel végeztük, mely a cella katódteréhez volt csatlakoztatva. A gáz- és a folyadék mintavétel egyszerre történt a cella katódteréből. A gáz minták analíziséhez egy Shimadzu GC-2010 Plus gázkromatográfot használtunk, amely egy BID detektorral volt felszerelve. A folyadék minták analízisét egy Shimadzu GC-MS 2010 SE készülékkel végeztük, amelyhez egy MS QP2010 típusú detektor volt csatlakoztatva. A szelektív ionkövetés (SIM-MS) biztosította a minták kvalitatív analízisét, a teljes ion kromatogram pedig lehetővé tette a keletkezett metanol és etanol mennyiségi analízisét.

A nitrátion redukciója során keletkező nitrition mennyiségét ionkromatográfiával (IC) határoztuk meg. A használt készülék egy Dionex DX3000 típusú kromatográfiás rendszer (Dionex, Sunnyvale, CA, USA), amely tartalmaz egy nagynyomású kromatográfiás modult (CHA-6), egy Dione EDM és egy Advanced Gradient Pump nevű modult. A mérés során egy vezetőképességmérő egység adta a kromatográfiás jelet. A kationok elválasztását egy Dionex IonPAC CS16 oszlop (3x250 mm), míg az anionok elválasztását egy Dionex IonPac AS15 (2x250 mm) oszlop végezte.

Az ammónia jelenlétét a fotoelektrolízis során vett mintákban első körben Berthelot teszttel végeztük (Indofenol alapú eljárás). Ezen felül Ar gázzal átbuborékolgatott 0,1 M koncentrációjú ^{15}N jelzett (98%) $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ oldat alkalmazása mellett figyeltük az esedékesen keletkező $^{15}\text{NH}_3$ jelenlétét a vett mintákban ^1H -NMR segítségével. Ugyanezzel a jelölt nitrácion tartalmú oldattal kvalitatív módon detektáltuk a fejlődő nitrogén gázt GC-MS segítségével.

A minták röntgenfotoelektron spektroszkópiai (XPS) vizsgálatát egy PHOIBOS 150 MCD 9 félgömb analízátorral ellátott SPECS műszerrel végeztük. A FAT üzemmódban lévő analízátor 40 eV áteresztési energiával (felmérő mérések során) és 20 eV áteresztési energiával (nagy felbontású méréseknel) üzemelt. Az Al $K\alpha$ sugárzó ($h\nu = 1486,6$ eV) röntgen ágyú 150W teljesítményen működött. Az áttekintő mérések során egy spektrum készült, míg a nagyfelbontású mérések során 20-30 spektrum átlagából adódott egy mérés. A spektrumok kiértékelését a CasaXPS program segítségével végeztük.

A Raman spektrumokat egy DXR Raman mikroszkóppal (Thermo Scientific, Waltham, USA) vettük fel, $\lambda = 532$ nm-es lézert alkalmazva, 5-10 mW teljesítménnyel.

Az egyes alkotók és a nanokompozitok morfológiáját pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM) vizsgáltuk felülnézeti és keresztmetszeti nézetben. A SEM felvételek elkészítéséhez egy Hitachi S-4700 típusú téremissziós pásztázó elektronmikroszkópot használtunk, 10 kV-os gyorsító feszültséget alkalmazva.

A fotoelektródok közel atomi szintű vizsgálatát transzmissziós elektronmikroszkópiával (TEM) végeztük egy FEI Tecnai G² X-Twin típusú készüléket, 200 kV-os gyorsító feszültséget alkalmazva. Egy Thermo Scientific Scios 2 SEM-FIB műszert használva készítettünk némely mintából vékony TEM lamellát, amely kvázi keresztmetszeti vizsgálati módot tesz lehetővé a TEM mérések alatt. Eme módszer során egy $12 \times 5 \mu\text{m}^2$ Pt párnát választunk le a minta felületére kb. $2 \mu\text{m}$ vastagságban. Ezután két árkot készítünk a párna két oldalán ionsugaras marással, kb. $7 \mu\text{m}$ mélységben. Ehhez a párnához hegesztjük oda az EasyLift precíziós tűt az ionsugár segítségével, mely tű megtartja a mintát, amikor egy $5 \mu\text{m}$ -es alávágással azt leválasztjuk az eredeti mintáról. Ezt a kivágott kis mintadarabot rögzítjük egy félhold alakú TEM mintatartón, amelyen ionsugárral tovább lehet vékonyítani annyira, hogy az bizonyos részekén átlátszóvá váljon az elektronok számára.

A Kelvin-szondával kapcsolt, légköri nyomáson üzemelő UV fotoelektron spektroszkópiás (APS) méréseket egy KP Technology APS04 készülékkel végeztük. Először az egyensúly beállta után a minta és a Kelvin-szonda között kialakuló kontakt potenciálkülönbséget (CPD) határoztuk meg. Ezt követően az APS méréseket stacionárius Kelvin-szondával végeztük.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK TÉZISSZERŰ BEMUTATÁSA

p-típusú Cu₂O/nanoszén kompozit elektródok fotoelektrokémiai tulajdonságai

T1. Elektrokémiai leválasztással nanokristályos Cu₂O hozható létre különböző nanoszén hordozók felületén. A leválasztott kristályok méretét és eloszlását befolyásolhatjuk egy pre-nukleációs lépéssel és a leválasztási töltésmennyiség kontrollálásával.

Egy több különböző potenciálon történő elektrokémiai leválasztási módszert fejlesztettünk és alkalmaztunk homogén és méretszabályozott Cu₂O nanokristályok szintézisére különböző spray-coating technikával készült szén nanocső és grafén filmek, illetve 3D grafén felületén. Egy negatívabb kezdeti potenciálon történő nukleációs lépés, valamint egy periodikusan közbeiktatott pihenő lépés (ahol a Cu²⁺ ionok utánpótlása a diffúzió által megtörténik) egyenletesebb kristályeloszlást eredményezett a nanoszén elektródokon.

T2. A Cu₂O-hoz képest megnövekedett fotoelektrokémiai aktivitás tapasztalható a Cu₂O/nanoszén fotoelektródok esetében, melynek oka a fotogenerált töltéshordozók hatékonyabb transzportja a nanoszén hordozó mátrixon keresztül.

A kompozit elektródok PEC aktivitását a CO₂ redukciójával bizonyítottuk (ahol főleg alkoholok keletkeztek). Ebben a rendszerben a Cu₂O fotoelektródokat a grafén tartalmú fotoelektródok felülmúlták mind az elért fotoáram, mind a stabilitás tekintetében, és a két komponens arányában található egy optimális összetétel. Elektrokémiai impedancia spektroszkópiás mérések alapján elmondható, hogy a nanoszén mátrix jelentősen növelte a nanokompozitok elektromos vezetését a Cu₂O-hoz képest. A gyors fototranziens mérések alapján a grafénréteg legfőképp a töltésválasztás és a töltéstranszport elősegítésében vesz részt, elősegítve ezzel a keletkező fotoelektronok hasznosítását a megvilágítás hatására.

T3. Az egységes 3D grafén struktúra előnyösebb hordozó, mint a spray-coating technikával készült, véletlenszerű felépítésű szén nanocső és grafén filmek, köszönhetően az utóbbiakban található fizikai szén-szén határfelületek hátrányos tulajdonságainak.

A gyors fotoáram-tranziens görbék illesztésével egy félkvantitatív elemzést készítettünk arról, hogy miként járul hozzá a kompozit fotoelektródok PEC aktivitásához a különböző nanoszén hordozók jelenléte. Ez a megközelítés lehetővé tette morfológiai szempontból a különböző nanoszenek összehasonlítását: a valódi felületre való normálás után a 3D grafén hordozó felülmulta a többi, véletlenszerű, nem orientált struktúrával rendelkező nanoszén hordozót. Az egységes, határfelületi érintkezést mellőző szerkezet hatékonyabbá tette a töltésszeparációt és

a töltéstranszportot a nanokompoziton belül, segítve ezzel a keletkező fotoelektronok hasznosítását.

Nanokristályos TiO_2 elektrokémiai leválasztása grafén hordozóra

T4. Az általunk kifejlesztett egylépéses elektrokémiai leválasztási módszerrel kristályos TiO_2 réteg hozható létre közvetlenül a szén hordozó (üvegszén vagy spray-coating technikával készült grafén film) felületén. A szintézismód magasabb hőmérsékletű (>200 °C) hőkezelés nélkül is pórusos és nanokristályos TiO_2 filmet eredményez a leválasztás során.

TEM, Raman spektroszkópiái és az XRD mérések igazolták, hogy az elektrokémiai leválasztással készült TiO_2 film kristályosságát az emelt hőmérsékletű (80 °C) leválasztó oldat, míg a fázisösszetételét az oldat kémhatása befolyásolja. Az ebből következő szabályozhatóság (pl. a leválasztott TiO_2 filmben a rutil/anatáz fázisok mennyisége), elősegíti a kívánt célalkalmazáshoz való felhasználást.

n-típusú Fe_2O_3 /grafén kompozit elektródok fotoelektrokémiai viselkedése

T5. Mind az elektrokémiai leválasztással készült Fe_2O_3 /grafén, mind a $\text{FeNiOOH}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ /grafén fotoelektródok esetében megnövekedett fotoelektrokémiai aktivitás mutatkozott a grafén nélküli párjaikhoz képest, köszönhetően a fotogenerált töltéshordozók hatékonyabb transzportjának a nanoszén hordozó mátrixon keresztül, hasonlóan, mint a p-típusú Cu_2O /nanoszén fotoelektródok esetében.

Közel 2,6 és 1,3-szoros fotoáram növekedés mérhető vízóxidációs reakcióban (ko-katalizátorral és nélküle) a grafén mentes fotoelektródokhoz képest, amely értékek felülmúlták a szakirodalomban fellelhető elektrokémiai leválasztással készült hematit fotoelektródokon mért eredményeket. Elektrokémiai impedancia spektroszkópiás mérések alapján elmondható, hogy a nanoszén jelentősen növelték a nanokompozitok elektromos vezetését.

T6. A megvilágítás hatására keletkező lyukak képesek oxidálni az Fe_2O_3 /grafén fotoelektródban a grafént. Egy elektrokémiai leválasztással szintetizált FeNiOOH felületi réteg hozzáadásával ez a korróziós effektus kiküszöbölhető.

A Raman spektroszkópiával kombinált hosszú távú fotoelektrokémiai mérések során bebizonyosodott, hogy a nanokompozitot felépítő grafén hordozó oxidálódik a félvezetőben megvilágítás hatására keletkező lyukak által. Ez a folyamat megszüntethető egy felületi FeNiOOH réteg kialakításával, amely az Fe_2O_3 -tól gyorsan átveszi a fotogenerált lyukakat,

ezáltal csökkentve a grafén korróziójának valószínűségét, egyúttal javítva a kompozit fotoelektródok stabilitását.

Nitrátionok fotoelektrokémiai redukciója CuI-PbI₂ nanokompozit fotoelektródokon

T7. A nitrátion fotoelektrokémiai redukciója megvalósítható kompozit CuI-PbI₂ elektródokon, ahol koncentrált megvilágítás mellett a legnagyobb mért fotoáram sűrűség $1,2 \pm 0,05 \text{ mA cm}^{-2}$ volt. A hosszú távú fotoelektrolízis során redukciós termékként nitrition és N₂ gáz keletkezett, H₂ gáz fejlődése nélkül.

A nitrátion redukciója során az áthaladt töltés közel 52%-a (Faraday-féle hatásfok) nitrition képződésére fordítódott, a fennmaradó töltés pedig nitrogén gáz fejlesztésére, ahogy azt egy félkvantitatív izotópjelzéses módszerrel kimutattuk. Emellett a kompozit fotoelektródok minden összetétel esetében felülmúlták a tiszta CuI-ot és PbI₂-ot tartalmazó fotoelektródokat, és az 50-50%-os összetétel adta a legnagyobb fotoáramot (ami egyben az eutektikus pontja is a CuI-PbI₂ rendszernek).

T8. A vizsgált CuI-PbI₂ nanokompoziton belül lehetséges az elektronok gerjesztése CuI vegyértéksávjából a PbI₂ vezetési sávjába, amely hozzájárul a megnövekedett PEC aktivitáshoz.

Optikai és PEC vizsgálatok megmutatták, hogy megvilágítás hatására lehetséges az elektronok gerjesztése a CuI vegyértéksávjából a PbI₂ vezetési sávjába, szélesítve ezzel a fotoelektródok látható fényt elnyelni képes tartományát. Ez a fajta többletelektron gerjesztés, kombinálva a nanokompozitban megvalósuló töltéshordozó szeparációval, alapvető szerepet játszik a kompozit minták teljesítményének javulásában.

4. TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) azonosító: 10074046

Az értekezéshez kapcsolódó tudományos közlemények

1. **E. Kecsenovity**, B. Endrődi, Zs. Pápa, K. Hernádi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Decoration of ultra-long carbon nanotubes with Cu₂O nanocrystals: a hybrid platform for enhanced photoelectrochemical CO₂ reduction, *Journal of Materials Chemistry A*, 4 (2016) 3139-3147.
IF₂₀₁₆ = 8,262
2. C. Janáky, **E. Kecsenovity**, K. Rajeshwar, Electrodeposition of Inorganic Oxide/Nanocarbon Composites: Opportunities and Challenges, *ChemElectroChem*. 3 (2016) 181-192.
IF₂₀₁₆ = 3,960
3. **E. Kecsenovity**, B. Endrődi, P. S. Tóth, Y. Zou, R. A. W. Dryfe, K. Rajeshwar, C. Janáky Enhanced Photoelectrochemical Performance of Cuprous Oxide/Graphene Nanohybrids, *Journal of the American Chemical Society*, 139 (2017) 6682-6692.
IF₂₀₁₇ = 13,038
4. B. Endrődi, **E. Kecsenovity**, K. Rajeshwar, C. Janáky, One-Step Electrodeposition of Nanocrystalline TiO₂ Films with Enhanced Photoelectrochemical Performance and Charge Storage, *ACS Applied Energy Materials*, 1 (2018) 851-858.
IF₂₀₁₈ = 4,473
5. A. Kormányos, **E. Kecsenovity**, A. Honarfar, T. Pullerits, C. Janáky, Hybrid FeNiOOH/ α -Fe₂O₃/Graphene Photoelectrodes with Advanced Water Oxidation Performance, *Advanced Functional Materials*, (2020) 2002124.
IF₂₀₂₀ = 18,808
6. **E. Kecsenovity**, S. T. Kochuveedu, J.P. Chou, K. Horváth, A. Gali, C. Janáky, Solar Photoelectroreduction of Nitrate Ions on PbI₂/CuI Nanocomposite Electrodes, *Solar RRL*, (2021) 2000418.
IF₂₀₂₀ = 8,582

$$\Sigma IF = 57,123$$

Az értekezés témájához nem kapcsolódó, nemzetközi folyóiratban megjelent tudományos közlemények

7. **E. Kecsenovity**, D. Fejes, B. Reti, K. Hernadi, Growth and characterization of bamboo-like carbon nanotubes on Fe-Co-Cu catalysts prepared by high energy ball milling, *Physica Status Solidi B*. 12 (2013) 2544-2548.
IF₂₀₁₃ = 1,370

8. D. Fejes, Z. Pápa, **E. Kecszenovity**, B. Réti, Z. Toth, K. Hernadi, Super growth of vertically aligned carbon nanotubes on pulsed laser deposited catalytic thin, *Applied Physics A*, 118 (2015) 855-861.
IF₂₀₁₅ = 1,444
9. A. Szabó, **E. Kecszenovity**, Z. Pápa, T. Gyulavári, K. Németh, E. Horvath, K. Hernadi, Influence of synthesis parameters on CCVD growth of vertically aligned carbon nanotubes over aluminum substrate, *Scientific Reports*, 7 (2017) 9557.
IF₂₀₁₇ = 4,259
10. E. Bárdos, G. Kovács, T. Gyulavári, K. Németh, **E. Kecszenovity**, P. Berki, L. Baia, Z. Pap, K. Hernádi, Novel synthesis approaches for WO₃-TiO₂/MWCNT composite photocatalysts-problematic issues of photoactivity enhancement factors, *Catalysis Today*, 300 (2018) 28-38.
IF₂₀₁₈ = 4,312
11. Z. Pápa, **E. Kecszenovity**, D. Fejes, J. Budai, Z. Tóth, K. Hernádi, Height and diameter dependence of carbon nanotube forests on the porosity and thickness of catalytic layers, *Applied Surface Science*, 428 (2018) 885-894.
IF₂₀₁₈ = 3,387
12. M.K. Hossain, **E. Kecszenovity**, A. Varga, M. Molnár, C. Janáky, K. Rajeshwar, Solution Combustion Synthesis of Complex Oxide Semiconductors, *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 27 (2018) 129-140.
IF₂₀₁₈ = 0,310
13. Z. Pápa, **E. Kecszenovity**, J. Csontos, A. Szabó, Z. Toth, J. Budai, Ellipsometric Analysis of Aligned Carbon Nanotubes for Designing Catalytic Support Systems, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19 (2019) 395-399.
IF₂₀₁₉ = 1,134
14. C. Grimaldi, **E. Kecszenovity**, M. Majidian, V.L. Kuznetsov, A. Magrez, L. Forró, Electrical transport in onion-like carbon-PMMA nanocomposites, *Applied Physics Letters*, 144 (2019) 103102.
IF₂₀₁₉ = 3,597
15. B. Endrődi, **E. Kecszenovity**, A. Samu, F. Darvas, R. V. Jones, V. Török, A. Danyi, C. Janáky, Multilayer Electrolyzer Stack Converts Carbon Dioxide to Gas Products at High Pressure with High Efficiency, *ACS Energy Letters*, 4 (2019) 1770-1777.
IF₂₀₁₉ = 19,003
16. B. Endrődi, **E. Kecszenovity**, A. Samu, T. Halmágyi, S. Rojas-Carbonell, L. Wang, Y. Yan, C. Janáky, High carbonate ion conductance of a robust PiperION membrane allows industrial current density and conversion in a zero-gap carbon dioxide electrolyzer cell, *Energy & Environmental Science*, 13 (2020) 4098-4105.
IF₂₀₂₀ = 38,532

17. B. Endrődi, A. Samu, **E. Kecszenovity**, T. Halmágyi, D. Sebők, C. Janáky, Operando cathode activation with alkali metal cations for high current density operation of water-fed zero-gap carbon dioxide electrolyzers, *Nature Energy*, 6 (2021) 439-448.
IF₂₀₂₀ = 60,585

ΣΣIF = 195,056

Résztétel nemzetközi konferencián

Első szerzőként

1. **E. Kecszenovity**, D. Fejes, K. Hernádi, A kén hatásának vizsgálata a CCVD szintézissel előállított szén nanostruktúrák szerkezetére, *XXXV. Kémiai Előadói Napok*, 2012. október 29 - 31., Szeged, Magyarország
2. **E. Kecszenovity**, D. Fejes, K. Hernádi, Bamboo-típusú szén nanocsövek előállítása és jellemzése Fe-Co-Cu alapú, nagyenergiájú őrléssel készült katalizátorokon, *XXXVI. Kémiai Előadói Napok*, 2013. október 29 - 31., Szeged, Magyarország
3. **E. Kecszenovity**, D. Fejes, K. Hernádi, Growth and characterization of bamboo-like carbon nanotubes on Fe-Co-Cu catalysts prepared by high energy ball milling, *Second International Symposium on Energy Challenges and Mechanics*, 2014. augusztus 19 - 21., Skócia, Aberdeen, Egyesült Királyság
4. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Electrochemical synthesis of metal-oxide/nanocarbon composites, *XL. Kémiai Előadói Napok*, 2017. október 16 - 18., Szeged, Magyarország, ACS Hungary szekció
5. **E. Kecszenovity**, K. Rajeshwar, C. Janáky, Solution combustion synthesis of Cu-Cu₂O-CuO composites, *8th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN8)*, 2018. október 7 - 10., Szeged, Magyarország
6. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Electrodeposition of semiconductor/nanocarbon photoelectrodes, *American Chemical Society National Meeting and Exposition (ACS Spring 2019)*, 2019. március 31 - április 4., Orlando, Florida, USA
7. **E. Kecszenovity**, S. T. Kochuveedu, C. Janáky, Fotoelektrokémiai ammónia szintézis nitrát ionból réz-jodid/ólom jodid kompozit fotoelektrodokon, *XLII. Kémiai Előadói Napok*, 2019. október 28 - 30., Szeged, Magyarország

Társszerzőként

8. B. Endrődi, D. Hursán, **E. Kecszenovity**, K. Rajeshwar, C. Janáky, Nanostructured hybrid electrodes for photoelectrochemical CO₂ conversion: synthetic aspects and structure-property relationships, *5th International Conference from Nanoparticles and Nanomaterials to Nanodevices and Nanosystems*, 2016. június 26 - 30, Porto Heli, Görögország
9. B. Endrődi, **E. Kecszenovity**, K. Rajeshwar, C. Janáky, Cu₂O/Nanocarbon Architectures for Photoelectrochemical CO₂ Conversion: Synthetic Aspects and Structure-Property Relationships *PRIME 230th ECS Meeting*, 2016. október 2 - 7., Honolulu, HI, USA

10. A. Kormányos, D. Hursán, C. Janáky, **E. Kecszenovity**, K. Rajeshwar Photoelectrochemical reduction of CO₂ on organic/inorganic nanocomposite photoelectrodes *253rd ACS National Meeting*, 2017. április 2 - 6. San Francisco, USA
11. A. Kormányos, D. Hursán, C. Janáky, **E. Kecszenovity**, K. Rajeshwar Photoelectrochemical reduction of CO₂ on organic/inorganic nanocomposite photoelectrodes *21st Topical Meeting of ISE*, 2017. április 23 - 26., Szeged, Magyarország
12. B. Endrődi, **E. Kecszenovity**, K. Rajeshwar, C. Janáky, Development of a Rapid, One-step Electrodeposition Method Resulting in Nanocrystalline TiO₂ Films with Enhanced (Photo)electrochemical Performance, *21st Topical Meeting of ISE*, 2017. április 23 - 26., Szeged, Magyarország
13. B. Endrődi, **E. Kecszenovity**, C. Janáky, Rationally Designed Semiconductor/Nanocarbon Photoelectrodes for Solar Fuel Generation, *233rd ECS Meeting*, 2018. május 13 - 17, Seattle, WA, USA

Poszter prezentáció

1. **E. Kecszenovity** Solar collector system with Stirling engine, *London International Youth Science Forum*, 2012. augusztus 16 - 30. London, Egyesült Királyság
2. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Decoration of ultralong carbon nanotubes with Cu₂O nanocrystals a hybrid platform for enhanced photoelectrochemical CO₂ reduction, *International Conferences of Modern Materials Technologies (CIMTEC)*, 2016. június 5 - 9., Perugia, Olaszország
3. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Decoration of ultralong carbon nanotubes with Cu₂O nanocrystals a hybrid platform for enhanced photoelectrochemical CO₂ reduction, *9th European Meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis (SPEA9)*, 2016. június 13 - 17., Strasbourg, Franciaország
4. **E. Kecszenovity**, C. Janáky, Nanostructured CuI/PbI₂ Alloys Act as Highly Efficient Photoelectrodes for Nitrate Reduction *21st Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry*, 2017. április 23 - 26., Szeged, Magyarország
5. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Reasons behind the improved performance of cuprous oxide/nanocarbon photoelectrodes, *254th American Chemical Society National Meeting and Exposition*, 2017. augusztus 20 - 24, Washington DC, USA
6. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Enhanced Photoelectrochemical Performance of Cuprous Oxide/Graphene Nanohybrids, *The 68th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry*, 2017. augusztus 27 - szeptember 1, Providence, USA
7. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky Solar fuel generation using metal-oxide/nanocarbon photoelectrodes, *3rd International Symposium on Energy And Environmental Photocatalytic Materials (EPPM3)*, 2018. május 15 - 19., Krakko, Lengyelország
8. **E. Kecszenovity**, B. Endrődi, K. Rajeshwar, C. Janáky, Electrodeposition of metal-oxide semiconductors on nanocarbon electrodes, *The 69th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry*, 2018. szeptember 2 - 7., Bologna, Olaszország

