

MTA Doktori Értekezés Tézisei

Ahol a fotoelektrokémia és az anyagtudomány találkoznak:
egyszerű és összetett fotoelektródok előállítása és
tulajdonságai

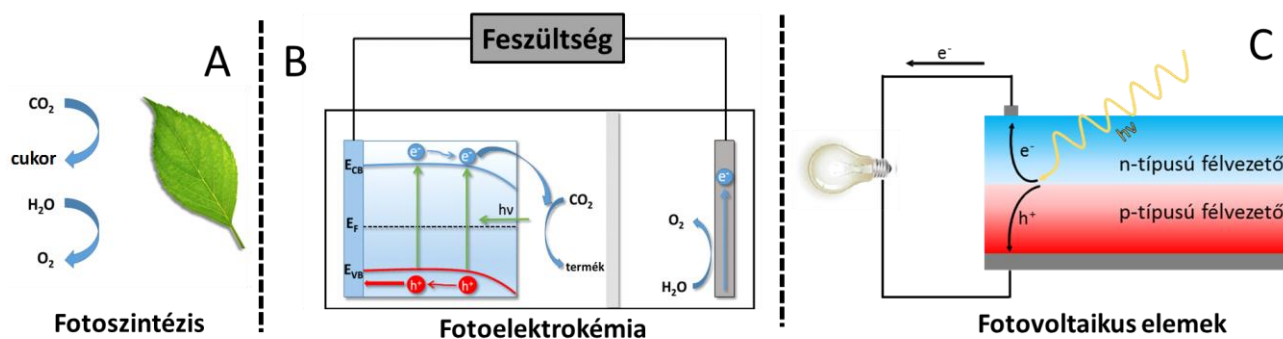
Dr. Janáky Csaba

Szegedi Tudományegyetem

Szeged, 2023

I. Bevezetés

A napenergia hasznosításának számos módja lehetséges, ezek közül néhányat illusztrál az 1. ábra.^{T45} A különböző félvezető/oldat határfelületen végbemenő folyamatok vizsgálata több évtizedes, ha nem évszázados múltra tekint vissza. Hamar felismerték, hogy a megvilágított félvezetők felületén különböző redoxi reakciók mehetnek végbe. Ezek felhasználhatók környezeti szennyezők ártalmatlanítására (oxidatív és redukív úton egyaránt), tüzelőanyagok előállítására (pl. vízbontás és szén-dioxid redukció), vagy akár szintetikus reakciók végrehajtása (pl. kapcsolási reakciók). Ahhoz, hogy ezeket a folyamatokat célzottan kihasználjuk, pontosan ismernünk kell mind a félvezetők belsejében, mind a félvezető/oldat határfelületen lejátszódó elemi lépéseket. Ezek ismeretében lehet racionálisan tervezett fotoelektrod anyagokat létrehozni, amelyek képesek lehetnek a gyakorlati alkalmazásokhoz szükséges teljesítményparaméterek elérésére. Kutatómunkám középpontjában minden esetben olyan fotoaktív anyagok álltak, amelyeket akár önmagukban vagy hordozó felületén rögzítve, fotoelektrodként alkalmazunk.



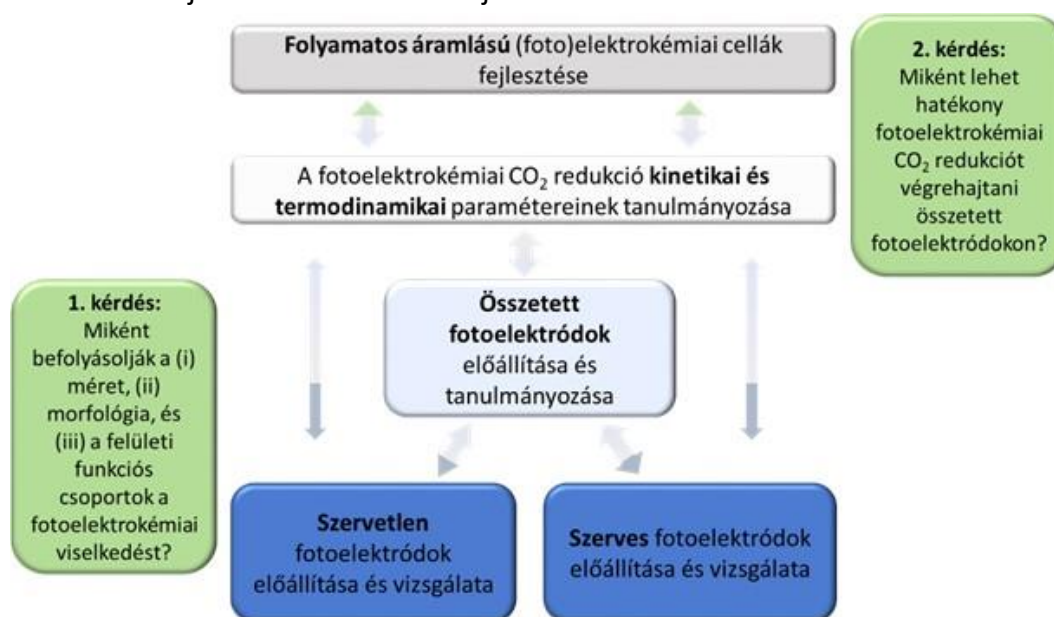
1. ábra A napenergia hasznosításának néhány fontosabb módszere.

Jóllehet a modern fotoelektrokémiai vizsgálatok az 1970-es évek elejére nyúlnak vissza, az elmúlt közel 50 év során nem sikerült kereskedelmi forgalomban kapható terméket előállítani (ez alól részleges kivételt képeznek a festékekkel érzékenyített napelemek). Ez különösen annak fényében érdekes, hogy a közel egyidőben indult lítiumion elemeket szerteágazóan használjuk a mindennapjainkban. Megítélésem szerint a lassú fejlődés alapvetően két tudományos, és számos egyéb okra vezethető vissza: (1) az új anyagok vizsgálatának/fejlesztésének hiánya (évtizedeken át túlzott titán-dioxid centrikusság), valamint (2) az új, kifinomult szintézismódszerek hiánya (oldatkémiai módszerek dominanciája). Ráadásul a nanotechnológia elmúlt két évtizedes vívmányai csak korlátozott mértékben, úgynevezett „trial and error” alapon épültek be a tudományterület mindennapjaiba. Fontos megemlíteni, hogy a fotoelektrokémia teljes fogalomtárát és elméleti hátterét félvezető egykristályokra dolgozták ki Gerischer és munkatársai, és mindezek az összefüggések a nanostruktúrákra nem, vagy csak korlátozottan érvényesek. Meggyőződésem, hogy amennyiben a fenti pontokban előre lépünk, akkor felgyorsulhat a terület fejlődése, és bizonyos területeken lehetőség nyílhat a gyakorlati hasznosításra.

II. Célkitűzések

Kutatómunkám során egy komplex célegyüttes mentén dolgoztam (2. ábra), amely magában foglalta:

- (i) újgenerációs fotoelektrodok (szerves vezető polimerek, perovszkitok, többfémű oxidok) előállítását és vizsgálatát;
- (ii) összetett elektrodok előállítását, ahol a három alapvető folyamat (a fényelnyelés, a töltéshordozó transzport, valamint a felületi elektrontranszfer) el van választva egymástól, és az ehhez szükséges, főként elektrokémiai, szintézismódszerek kidolgozását;
- (iii) szerkezet–hatás összefüggések felderítését a tüzelőanyagok fotoelektrokémiai előállítása során;
- (iv) *in situ* elektrokémiai jellemzési technikák fejlesztését.



2. ábra A kutatómunka célrendszere.

Hangsúlyozom ugyanakkor, hogy ezen témakörök szorosan és dinamikusan összefüggenek egymással, hiszen a megismert összefüggések ismeretében lehetséges új anyagokat előállítani, amelyhez viszont a szintézismódszerek folyamatos hangolása szükséges.

III. A kutatómunka során alkalmazott kísérleti módszerek

Munkánk során különböző egyszerű és összetett fotoelektrodokat állítottunk elő. Ehhez elektrokémiai anodizációs, elektrodepozíciós, oldatbelobbantásos, és oldatkémiai eljárásokat használtunk és fejlesztettünk. Előállítottuk fém-oxid, fém-halogenid, és szerves polimer alapú fotoelektrodokat. Ezek közül többet előállítottunk nagy felületű, nagy elektromos vezetőképességgel rendelkező szénhordozók (pl. szén-nanocsövek és grafén) felületén. Számos esetben fém nanorészecske katalizátorokat is rögzítettünk a félvezetők felületén. Új fotokatalitikus

szintézismódszereket dolgoztunk ki annak érdekében, hogy különböző félvezetők felületén rögzítsünk egy másik félvezetőt, ezáltal összetett elektródokat kialakítva.

Az előállított fotoelektródok morfológiáját elektronmikroszkópiás (TEM, SEM) módszerekkel jellemeztük, összetételüket spektroszkópiai (IR, Raman) és röntgenes (XRD, XPS) módszerekkel vizsgáltuk. A különböző félvezető fotoelektródok optikai tulajdonságait egy kombinált eszközzel tanulmányoztuk, amely tartalmazott Kelvin szondát (KP), felületi fotofeszültség spektroszkópot (SPS), és légköri fotoelektronspektroszkópot (APS). Az elektrokémiai mérések során végbementő szerkezeti változások tanulmányozására beüzemeltünk egy *in situ* Raman spektroelektrokémiai méréseket lehetővé tevő elektrokémiai cellát. Fotoelektrokémiai jellemzésre legtöbbször a fotovoltammetria és a beeső foton-áram konverziós hatásfok (IPCE) mérése szolgált, amelyek némely esetben kiegészült gyors tranzienst fotoáram méréssel is. Sok esetben használtunk intenzitás modulált fotoáram spektroszkópiát (IMPS), amely az elektrokémiai impedancia spektroszkópia analógja, azzal a különbséggel, hogy itt nem az elektródpotenciált változtatjuk szinuszosan egy egyensúlyi potenciál környezetében, hanem a gerjesztő fény intenzitását.

A különböző fotoelektrokémiai folyamatok során keletkező termékek gyors, pontos, és precíz detektálása kulcsfontosságú volt a különböző elektródokon végrehajtott reakciók összehasonlítása során. A vízbontás és a CO₂ redukció során keletkező gázfázisú termékeket *on-line* gázkromatográfiával vizsgáltuk. A folyadékfázisú CO₂ redukciós termékek analizését általában *ex situ* NMR spektroszkópiával és GC-MS módszerrel vizsgáltuk.

IV. Új tudományos eredmények

1. Oxid félvezetők előállítása oldatbelobbantásos szintézissel. Az oldatbelobbantásos módszer során a prekursoraként használt fém-nitrát (oxidálószer) és egy szerves üzemanyag között lejátszódó erősen exoterm reakció belobbantja az elegyet, így alakítva ki a kívánt fém-oxidot. Ezt a módszert főleg két- és háromfémű oxidok előállítására használtuk.^{T12, T17, T21, T22, T32, T36}

1.1. Több különböző oxid példáján (Ag₂WO₄, CuWO₄, ZnWO₄, Bi_{2-x}M_xTi₂O₇ (M: Fe, Mn), CuCrO₂) igazoltuk, hogy az üzemanyag/oxidálószer arány változtatásának hatására az előállított termék összetétele, és a megjelenő fázisok aránya szabályozható.^{T12, T21, T32, T36}

1.2. Bebizonyítottuk, hogy különböző idegen fémionok beépíthetők a szintézis során egy adott kétfémű oxid, pl. a Bi₂Ti₂O₇ kristályrácsába. A Fe(III) kristályrácsba történő beépítésével (Fe_xBi_{2-x}Ti₂O₇, ahol x=0,01; 0,05; 0,1; 0,25 és 0,50) az anyag optikai tiltottsáv-szélessége jelentősen lecsökkent, arányosan a beépülő Fe(III) mennyiségével.^{T21}

1.3. Megmutattuk, hogy az oldatbelobbantásos szintézismódszer alkalmas nagy felületű fém oxidok előállítására. Ennek oka az, hogy a reakció során az üzemanyag égéséből keletkező és távozó nagy mennyiségű CO₂, N₂ és vízgőz pórusos struktúrákat eredményez.^{T36}

2. Fém halogenidok használata fotoelektródként. Oldatkémiai szintézissel állítottunk elő mind egyszerű fém-halogenid (CuI és PbI₂)^{T38, T39, T47}, mind összetett perovszkit (pl. CsPbBr₃, MAPbI₃,

MAPbBr₃) fotoelektrodokat.^{T29,T30,T37,T42,T44,T53} *Feltártuk a korróziós mechanizmusokat, és stratégiákat vázoltunk fel azok elkerülésére.*^{T48,T53}

2.1. Megmutattuk, hogy a CuI *p*-típusú félvezetőként viselkedik, és sokkal stabilabb a fotokorrózióval szemben, mint a Cu₂O. Ez termodinamikai szempontokat tekintve meglepő, ugyanakkor a CuI és a Cu különböző kristályszerkezete okozhatja a folyamat kinetikai gátlását.^{T38}

2.2. Különböző CuI-PbI₂ nanokompozit elektrodok esetében igazoltuk, hogy az ötvözet fotoelektrokémiai aktivitása jelentősen meghaladja az egyedi komponensekét, és az optimális viselkedés 1:1 mólaránynál adódik. Megmutattuk, hogy alapvetően az PbI₂ elnyeléséhez kötődő fotoáramok növekedtek meg, ami a CuI ko-katalizátorként való viselkedését jelzi. Ezen túlmenően, az ötvözetben megjelenő új elnyelés (1,8 eV tiltottsáv-szélesség tartozik hozzá), is hozzájárult a fotoáramokhoz.^{T47}

2.3. CsPbBr₃ és MAPbI₃ esetében azonosítottuk a különböző korróziós és fotokorróziós folyamatokat, valamint a keletkező degradációs termékeket. Megmutattuk, hogy a termodinamikai instabilitás nem minden esetben jár fotokorrózióval, mivel kinetikai stabilizálás elérhető (amennyiben a fotogenerált töltéshordozókat sikerül elvezetni az elektródról).^{T30}

2.4. Egyértelműen bizonyítottuk, hogy a vegyes fémhalogenid-perovszkitokban (pl. CH₃NH₃PbBr_{1,5}I_{1,5}) megvilágítás hatására fellépő fázisszegregáció^{T26} a hibahelyeken való lyukcsapdázódáshoz és a vegyértéksávba való lyuk injektáláshoz kapcsolódik. Megmutattuk, hogy a rácsban csapdázódó lyukak hatására a jodid ionok fokozatosan kiürülnek a vegyes halogenid filmből (jód és/vagy trijodid ion formájában), és CH₃NH₃PbBr₃ domének maradnak vissza.^{T42}

2.5. CsPbBr₃ fotoelektrodok példáján bemutattuk, hogy a gyakran alkalmazott TCNQ mediátor nem inert. Fotoelektrokémiai mérések során mediátorként működik az alkalmazott diklórmétán oldószer és a CsPbBr₃ között, amelynek eredményeképpen felgyorsítja a két vegyület közötti halogenidcserét, és ezáltal a fotoelektrod korrózióját.^{T53}

3. Elektromosan vezető polimer alapú fotoelektrodokat állítottunk elő, és vizsgáltunk a CO₂ fotoelektrokémiai redukciójában. A vezető polimereknek a szerepe sokrétű lehet ebben a reakcióban, hiszen azon túl, hogy adszorbeálják a szén-dioxidot, betöltik a fényelnyelő szerepét és molekuláris katalizátorként is funkcionálnak. Ennek vizsgálatára polianilint, polipirrolt, poli(N-metilanilint), ezek származékait, és poli(3,4-etiléndioxitifént) állítottunk elő elektrokémiai eljárással.^{T19, T20, T35}

3.1. Megmutattuk, hogy az elektromosan vezető polimereken a CO₂ fotoelektrokémiai átalakítása végrehajtható. Polianilin fotoelektrodok esetében egyértelműen elkülönítettük egymástól a protonredukciót és a CO₂ redukcióját. Hosszú idejű fotoelektrolízist végezve redukciós termékként alkoholokat (metil-alkoholt és etil-alkoholt) sikerült kimutatnunk GC-MS technikával.^{T19}

3.2. Megállapítottuk, hogy alapvetően a következő három kritériumnak kell megfelelniük a polimereknek, ahhoz, hogy fotoelektrokémiaailag aktívak legyenek a CO₂ átalakításában:^{T19}

1. A vezetési sávjuk (LUMO-pályájuk) potenciálja negatívabb legyen a CO₂ redukciós reakciók termodinamikai potenciáljánál.

2. Azon a potenciáltartományon, ahol a vizsgálatokat végezzük, a polimer teljesen redukált állapotban legyen (a vegyértéksávjának potenciálja megfelelően pozitív legyen). Ellenkező esetben a polimer saját elektrokémiai viselkedése fog dominálni.
3. A polimer rendelkezzen jó CO₂ adszorpciós kapacitással, vagyis tartalmazzon primer vagy szekunder amin-csoportot, amely részvételével kemiszorpció történhet.

4. Összetett félvezető elektródok előállítása elektrokémiai leválasztással. *Különböző nanoszerkezetű szénelektrodokra (pl. szén nanocső (CNT) és grafén filmek, 3D grafén) is választottunk le félvezetőket elektrokémiai módszerekkel.^{T15} Ezen túlmenően, szerves-szerves és szerves-szerves kompozitokat is előállítottunk ily módon.*

4.1. Azonosítottuk azokat a körülményeket, amivel szabályozott és homogén Cu₂O borítottságot érhetünk el nanoszerkezetű szénelektrod felületeken. Az alkalmazott módszer különlegessége volt a negatívabb kezdőpotenciálon végzett nukleációs lépés és a periodikus szüneteltetés a diffúzió elősegítésére. Igazoltuk, hogy leválasztási idő (és ezáltal az átvitt töltés) szabályozásával a Cu₂O kristályok méretét is hangolhatjuk, az 50-120 nm-es tartományban.^{T16, T24}

4.2. Kidolgoztunk egy olyan szintézismódszert, mellyel egy lépésben, rögtön az elektrodepozíció során kristályos titán-dioxidot kaphatunk nanoszén hordozók felületén. Titán(III)-klorid savas oldatából anódos leválasztással állítottunk elő TiO₂-t, miközben az oldat kémhatását és hőmérsékletét szabályoztuk. Megmutattuk, hogy előbbivel a keletkező titán-dioxid összetételét (anatáz és rutil tartalom), utóbbival pedig a leválasztott anyag kristályosságát lehet szabályozni.^{T31}

4.3. Megmutattuk, hogy nanoszén tartalmú kompozitokat elő lehet állítani szerves vezető polimerekkel is, ily módon PEDOT és polianilin tartalmú, grafén és szén nanocső alapú elektródokat készítettünk. A polimerizációs töltéssűrűség értékét változtattuk, így előállítva különféle összetételű PEDOT/nanoszén nanokompozit fotoelektrodokat.^{T35}

4.4. Rézlemezen termikus kezeléssel előállított CuO nanoszálakat vontunk be elektrokémiai leválasztással előállított Cu₂O-al. Különböző összetételű és morfológiájú összetett elektródokat állítottunk elő, és megmutattuk, hogy ezen elektródokon a CO₂ fotoelektrokémiai redukációjával metanolt lehet előállítani. Azt is igazoltuk, hogy az összetétel változtatásával mind a fotoáram, mind a képződő termékek összetétele változik.^{T1, T2}

4.5. Elektrokémiai polimerizációs módszerrel állítottunk elő SiC/PANI nanokompozitokat, amely módszer során a PANI vékonyréteggé vonta be a SiC nanorészecskéket. Az így előállított nanokompozit elektród esetében nagyobb katódos fotoáramokat mértünk, mint az egyedi komponensek esetében. Igazoltuk, hogy ennek hátterében a PANI katalitikus hatása áll.^{T27}

5. Összetett félvezető elektródok előállítása fényel segített polimerizációs folyamatokkal. A félvezető elektródok kis elektromos vezetése számos esetben korlátozza az elektrokémiai polimerizációs módszerek használatát.^{T4, T5, T13} Ezen probléma lehetőséggé változtatható, amennyiben megvilágítjuk a fotoelektrodot a szintézis során.^{T8, T11}

5.1. Szervetlen félvezetőkön szerves félvezetők előállítását demonstrálandó elvégeztük PEDOT fotoelektrokémiai leválasztását CdS és CdSe-el érzékenyített TiO_2 nanocsövek felületére. Bemutattuk, hogy szintézis során a megvilágítás hatására képződő lyukak képesek oxidálni a monomert, amely elindítja a polimerizációs folyamatot, és kialakul a szerves vezető polimer bevonat. Igazoltuk, hogy a PEDOT növekedésének sebessége (és ezáltal a képződő bevonat homogenitása) szabályozható az oxidációs potenciállal.^{T5,T9} Ez eljárást kiterjesztettük számos további kompozitra, TiO_2 nanocsőköteg, nanopórusos WO_3 , és perovszkit templátok használatával.^{T4,T8,T11}

5.2. Igazoltuk, hogy szerves félvezetőkre is leválaszthatóak szervetlen félvezető nanorészecskék. Előző eljárás mintegy inverzeként, egydimenziós szerkezetű poli(3-hexiltiofén) nanoszálak felszínére választottunk le fém-kalkogenideket (CdS, Sb_2S_3) fotokatalitikus úton. Első lépésben a poli(3-hexiltiofén) polimert a megfelelő hullámhosszúságú fényel gerjesztettük. Igazoltuk, hogy a fotoelektronok az átmenetifémiont redukálják és így lehetőség van arra, hogy a CdS vagy Sb_2S_3 leválhasson a polimerszálakon.^{T14}

6. A morfológia hatása a fotoelektrokémiai tulajdonságokra. *Az elektrokatalizátorok terén szerzett tapasztalatainktól^{T41} motiválva különböző félvezetők estében vizsgáltuk, hogy miként befolyásolja a fotoelektród morfológiája (alak, méret) a fotoelektrokémiai aktivitást.*

6.1. Három különböző szerkezetű WO_3 vékonyréteget állítottam elő (kompakt film, nanorészecskés film, koherens nanopórusos film). Savas közegű vízoxidációs folyamatban bemutattam, hogy a morfológiától függően akár egy nagyságrend különbség is lehet a mérhető fotoáramok nagyságában, egyéb paraméterek változatlansága mellett. A legnagyobb aktivitása a nanopórusos filmnek volt.^{T7}

6.2. Oldatkémiai módszerekkel állítottunk elő 0D (pötty), 1D (rúd), és 2D (lap) TiO_2 nanoszerkezeteket, amelyek nano-kiterjedése (átmérő a pöttyöknél és rudaknál, vastagság a lapok esetében) kb. 10 nm volt. Az így előállított fotoelektródokat vizsgáltuk mind vízoxidációban (ahol van kinetikai gátlás), mind szulfid-ion oxidációban (ahol nincs kinetikai gátlás). ICPE és IMPS mérésekkel igazoltuk, hogy a morfológia a töltéshordozók transzportját és határfelületi transzferét egyaránt befolyásolja, és a nanorudas minták esetében mérhető a legnagyobb fotoáram.^{T49}

6.3. 2D nanoszerkezetű anyagok vizsgálata során igazoltuk, hogy a tömbfázisú lapok esetében figyelhető meg a legnagyobb fotoelektrokémiai aktivitás, még akkor is, ha a nagyobb fényelnyelésből eredő triviális hatással korrigált értékeket nézzük. Igazoltuk azt is, hogy az élek és teraszok fotoelektrokémiai aktivitása lényegesen kisebb a belső síkokhoz képest. Ez a trend alapvetően a rekombinációs centrumként működő hibahelyek eltérő mennyiségével volt magyarázható.^{T50}

7. Fotoelektrokémiai folyamatok hatásfokának növelése összetett elektródokkal. *A fotoelektrokémiai reakciók hatékony végrehajtásához a félvezető fotoelektródnak a következő tulajdonságokkal kell rendelkeznie: (1) fényelnyelés: elengedhetetlen a napfény spektrumának jelentős részének elnyelése, (2) töltéshordozó transzport: a félvezetőnek nagy a töltőhordozó mobilitással kell rendelkeznie, a tömbi és a felszíni hibahelyek mennyiségét egyaránt minimalizálni kell; (3) töltésátviteli kinetika: gyors töltésátvitel a félvezetőről az oldatban lévő szubsztrát molekulákra vagy a mediátorra.^{T10}*

7.1. Igazoltuk, hogy a fényelnyelés növelése lehetséges olyan többfémű vegyes oxidok előállításával, amelyben a fémionok egymással helyettesíthetők.^{T6} A $\text{CuFe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{O}_2$ példáján megmutattuk, hogy a tiltottsáv-szélessége a megfelelő kétfémű oxidokra jellemző értékek között hangolható.^{T34}

7.2. Megmutattuk, hogy a fényelnyelés növelése úgyis lehetséges, hogy két olyan félvezetőt kapcsolunk egymáshoz, amelyek tiltottsáv-szélessége eltérő.^{T28} Annak érdekében, hogy kinyerhessük a két félvezetőben keletkező töltéshordozókat, azoknak egymáshoz viszonyított sávpozícióinak megfelelően kell elhelyezkedniük, az elektródnak pedig megfelelő geometriával kell rendelkeznie. Így lehet vertikális elektrontranszferet elérni, amit a CuBi_2O_4 , CuO , és Bi_2O_3 oxidokból felépülő fotokatódok példáján mutattuk be.^{T22}

7.3. Igazoltuk, hogy a félvezető elektródok hatásfoka javítható, ha a félvezetőket jól vezető, nanoszerkezetű szubsztrátra választjuk le, amely a fotogenerált töltéshordozókat gyorsan és hatékonyan el tudja vezetni, ezáltal növelve a töltéshordozó mobilitást,^{T3} egyúttal javítva a kompozit anyagok fotostabilitását is. A $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CNT}$ vékonyrétegek esetében igazoltuk, hogy ezen sajátságok a kompozit összetételével hangolhatók.^{T16}

7.4. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{grafén}$ elektródok fotoelektrokémiai vizsgálata során megmutattuk, hogy a Cu_2O optoelektronikai tulajdonságai nem változtak a kompozitban, ugyanakkor a rendszer aktivitása és stabilitása növekedett. Összehasonlító vizsgálatokat végeztünk különböző vastagságú és morfológiájú grafén hordozókkal, és feltártuk, hogy a különböző nanoszén hordozók elsődleges szerepe a nagy fajlagos felület biztosítása.^{T24}

7.5. A PEDOT/CNT elektródok esetén mintegy négyszeres fotoáramtöbbletet-, míg a PEDOT/grafén rétegek esetén pedig két és félszeres növekményt tapasztaltunk a sima polimerhez képest. Megállapítottuk, hogy a megnövekedett fotoelektrokémiai aktivitás okát a vezetési sajátságok megváltozásában kell keresni.^{T35}

7.6. Elektrokémiai anodizációval állítottunk elő nanopórusos NiO rétegeket, és a katalitikus tulajdonságok javítása érdekében Pt ko-katalizátorokat vittünk fel rá 1,5–12,0 nm-es mérettartományban, öt különböző méretben. Megmutattuk, hogy a Pt ko-katalizátor mérete miként befolyásolja a katalitikus aktivitást fotoelektrokémiai redukciós folyamatokban (H_2 fejlesztés, CO_2 redukció). Igazoltuk, hogy a ko-katalizátor méretének kompatibilisnek kell lennie a félvezető pórus szerkezetével, és esetünkben a 4–5 nm-es részecskék bizonyultak optimálisnak.^{T23}

7.7. 2D WSe_2 nanolapok esetében igazoltuk, hogy a Pt-leválasztás nem csak a katalitikus aktivitás növelése révén javíthatja a fotoelektrokémiai viselkedést. Amennyiben atomi rétegleválasztási eljárással rögzítettünk Pt nanorészecskéket a félvezető nanolapok felületén, a szintézis során *in situ* passziváltunk olyan hibahelyeket, amelyek rekombinációs centrumként viselkedhetnek.^{T55}

7.8. Igazoltuk a $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ határfelület kitüntetett szerepét mind az elektrokémiai, mind a fotoelektrokémiai CO_2 -redukciós reakcióban. Megmutattuk, hogy a fotoelektrokémiai korrózió eredményeképpen keletkező réz nanorészecskék megjelenése segíti a CO_2 redukciós folyamatot (másképp fogalmazva, a Cu nanokocka kokatalizátorok *in situ* képződnek a fotoelektrokémiai

folyamat során), ugyanakkor ha a fotokorróziót dominánssá válik, akkor az hátrányosan hat a fotoelektrokémiai tulajdonságokra.^{T18}

7.9. Igazoltuk, hogy a különböző, fotoelektrokémiai viselkedés javítását célzó stratégiák kombinálhatók is. Ezt a FeNiOOH/Fe₂O₃/grafén nanohibrid elektródok példáján vizsgáltuk, amelyben a Fe₂O₃ felelős a fényelnyelésért, a grafén váz a megfelelő töltéshordozó-szállításért, míg a FeNiOOH réteg a hatékony víz oxidációért (katalízisért). Fotovoltammetriás és IPCE mérések során 2,6-szor nagyobb fotoáramot kaptunk a legjobban teljesítő FeNiOOH/Fe₂O₃/grafén rendszerben, a tiszta Fe₂O₃-hoz képest.^{T46}

8. *In situ* mérési módszerek a (foto)elektrokémiai reakciók vizsgálatában. A különböző *in situ* és *operando* módszerekkel célunk az elektródok felületén és anyagában történő folyamatok vizsgálata^{T40}, amelynek segítségével megérthetjük a különböző elemi folyamatokat.

8.1. Perovszkitok vizsgálatában elsőként alkalmaztunk ultragyors tranziens abszorpciós spektroszkópiai méréseket *in situ* elektrokémiai kontroll alatt, annak érdekében, hogy megértsük az elektrokémiai polarizáció szerepét a töltéshordozók rekombinációs folyamatai során. Igazoltuk, hogy a perovszkit réteg alatt elhelyezkedő TiO₂ alapréteg betöltöttsége döntően meghatározza a perovszkitról való elektrontranszfer sebességét.^{T29}

8.2. Ultragyors tranziens abszorpciós vizsgálatokkal igazoltuk, hogy amennyiben amennyiben a CuI-ban generált töltéshordozók csapdázódhatnak a tiltottsávon belül elhelyezkedő energiaszinteken, a rekombináció sebessége csökken. Ez azzal magyarázható, hogy az ezen nívókon keresztül megvalósuló rekombinációs folyamat lassabb, mint a töltéshordozók vegyérték- és vezetési sáv közötti közvetlen rekombinációja.^{T39}

8.3. Az *in situ* Raman spektroelektrokémiai vizsgálatok rámutattak arra, hogy pozitívabb potenciálokra a CuI-ban található hibahelyek kiürítése egy rendezetlenebb szerkezetet eredményez. Elektrokémiai impedancia spektroszkópiás vizsgálatokkal megmutattuk, hogy a CuI-ban lévő hibahelyek elektronokkal történő reverzibilis betöltése és kiürítése a felelős az elektromos tulajdonságok változásaiért. Az optikai és elektromos tulajdonságok változásai azonban más potenciáltartományon mennek végbe. A tiltottsáv mélyebb részein fekvő hibahelyek felelősek az elektromos tulajdonságok alakulásáért, míg a vegyértéksávhoz közelebb elhelyezkedő hibahelyek optikai változásokért.^{T38}

8.4. Igazoltuk az elektrolit kation anyagi minőségének a szerepét a redukált TiO₂ létrehozása során. Megmutattuk, hogy a Ti(III) hibahelyek kialakulásával párhuzamosan az elektrolit kationjai interkalálódnak a rácsban, ami viszont gátolt a nagyméretű kationok esetében. *In situ* spektroszkópiai módszerekkel a különböző típusú hibahelyek kialakulását is el tudtuk különíteni.^{T52}

8.5. Szelektív ¹³C izotópjelzéses vizsgálatokkal tanulmányoztuk, hogy kétterű H-cellában a CO₂ vagy a HCO₃⁻ ion reagál-e az elektród felületén. Megállapítottuk, hogy az elektród felületen a CO_{2,aq} reagál, azonban a HCO₃⁻ ion tartalmú elektrolitnak kulcsszerepe van a CO₂ pótlásában az elektród felületén („CO₂-puffer”).^{T33}

2. Az eredmények várható alkalmazásai

Az értekezésben nem foglalkoztam a CO₂ *elektrokatalitikus* átalakításával, amely a kutatócsoportom másik fő iránya. Ugyanakkor kitekintésként fontos megemlíteni a folyamatos áramlású reaktorok fejlesztése irányában tett erőfeszítéseinket,^{T43,T51} mivel ezen tudást felhasználva jelenleg folyamatos üzemű *fotoelektrokémiai* cellák fejlesztésén dolgozunk. Eddigi eredményeink azt mutatják, hogy a folyamatos áramlású reaktorokban történő (foto)elektrokémiai vizsgálatok sok esetben gyökeresen más eredményt mutatnak, mint a klasszikus, statikus cellákban mértek. Éppen ezért, már a kutatási tevékenység elejétől fogva fontos, hogy ilyen elrendezésben is vizsgáljuk a különböző elektródokat és fotoelektrodokat. Így el tudjuk kerülni azt a helyzetet, hogy nagyon sok időt eltöltünk olyan elektródok vizsgálatával, amelyek a folyamatos áramlású cellákban nem mutatnak ígéretes aktivitást és stabilitást.

A szakterület eredményeit áttekintve^{T25} megterveztük első elektrokémiai cellákat, amelyekben a folyamatos CO₂ betáplálás mellett lehet vizsgálni a CO₂ redukcióját. A legfontosabb kérdés, hogy a szén-dioxidot oldat, vagy gáz formájában, vagy mindkét formában tápláljuk-e be. Mindhárom eset megvalósítására terveztünk, és gyárttatunk elektrokémiai cellákat. A következő lépés a működtetési körülmények hatásának a vizsgálata, amelyek közül itt a nyomás kérdését emelem ki, amely különösen innovatív megoldásokat igényelt. Az így kapott ígéretes eredmények alapján a folyamatos áramlású cellák első generációjának műszaki megoldásai kapcsán az első két alapszabadalmat benyújtottuk, és ugyanez várható a közeljövőben a fotoelektrokémiai cellák kapcsán.

A közelmúltban ismertettünk egy olyan megoldást, amelyben egy egységben integráltunk egy fotovoltikus elemet és egy elektrokémiai cellát. Mindezt olyan módon, hogy alkalmas legyen koncentrált napfényvel való megvilágításra (max. 45 W/cm², 450 nap!), és a két részegység termikusan is integrálva legyen. A koncentrált besugárzás hasznosításának köszönhetően nagy teljesítménysűrűséget kaptunk, a CO képződéshez kötődő parciális áramsűrűség 0,15 A cm⁻² felett volt. A megfelelő anyag- és módszerválasztás lehetővé tették az aktiválási túlfeszültség és az ohmikus veszteségek minimális szinten tartását, így a napfényből-CO átalakítás hatásfoka meghaladta a 17%-ot. A nagy bemeneti teljesítmény és a nagy konverziós hatásfok kombinációja eredményezte ezt az első közvetlenül napfény felhasználásával működő, és 1 NL_{CO} h⁻¹ feletti termelési sebességgel működő berendezést.^{T54}

3. Az értekezés alapját képező közlemények

1. G. Ghadimkhani, N. R. de Tacconi, W. Chanmanee, **C. Janáky**, K. Rajeshwar: *Efficient solar photoelectrosynthesis of methanol from carbon dioxide using hybrid CuO/Cu₂O semiconductor nanorod arrays* Chemical Communications, 49 (2013) 1297-1299
2. K. Rajeshwar, N. R. de Tacconi, G. Ghadimkhani, W. Chanmanee, **C. Janáky**: *Tailoring copper oxide semiconductor nanorod arrays for photoelectrochemical reduction of carbon dioxide to methanol* ChemPhysChem, 14 (2013) 2251-2259
3. K. Rajeshwar, **C. Janáky**, W. Y. Lin, D. Roberts, W. Wampler: *Photocatalytically-Prepared Metal Nanocluster-Oxide Semiconductor-Carbon Nanocomposite Electrodes for Driving Multi-electron Processes* Journal of Physical Chemistry Letters, 4 (2013) 3468–3478
4. **C. Janáky**, N. R. de Tacconi, W. Chanmanee, K. Rajeshwar: *Electrodeposited Polyaniline in a Nanoporous WO₃ Matrix: An Organic/Inorganic Hybrid Exhibiting Both p- and n-Type Photoelectrochemical Activity* Journal of Physical Chemistry C, 116 (2012) 4234-4242
5. **C. Janáky**, N. R. de Tacconi, W. Chanmanee, K. Rajeshwar: *Bringing Conjugated Polymers and Oxide Nanoarchitectures into Intimate Contact: Light Induced Electrodeposition of Polypyrrole and Polyaniline on Nanoporous WO₃ or TiO₂ Nanotube Arrays* Journal of Physical Chemistry C, 116 (2012) 19145-19155
6. **C. Janáky**, K. Rajeshwar, N. R. de Tacconi, W. Chanmanee, M. Huda: *Tungsten-based oxide semiconductors for solar hydrogen generation* Catalysis Today, 199 (2013) 53-64
7. **C. Janáky**, W. Chanmanee, K. Rajeshwar: *On the substantially improved photoelectrochemical properties of nanoporous WO₃ through surface decoration with RuO₂* Electrocatysis, 4 (2013) 382-389
8. **C. Janáky**, W. Chanmanee, K. Rajeshwar: *Mechanistic Aspects of Photoelectrochemical Polymerization of Polypyrrole on a TiO₂ Nanotube Array* Electrochimica Acta, 122 (2014) 303-309
9. G. F. Samu, C. Visy, K. Rajeshwar, S. Sarker, V. R. Subramanian and **C. Janáky**: *Photoelectrochemical Infiltration of PEDOT into Metal-Chalcogenide Decorated TiO₂ Nanotube Arrays* Electrochimica Acta, 151 (2015) 467-476
10. K. Rajeshwar, A. Thomas, **C. Janáky**: *Photocatalytic Activity of Inorganic Semiconductor Surfaces: Myths, Hype, and Reality* Journal of Physical Chemistry Letters, 6 (2015), 139-147
11. **C. Janáky**, K. Rajeshwar: *The Role of (Photo)electrochemistry in the Rational Design of Hybrid Conducting Polymer / Semiconductor Assemblies: From Fundamental Concepts to Practical Applications.* Progress in Polymer Science, 43 (2015) 96-135
12. A. Thomas, **C. Janáky**, G. F. Samu, M. N. Huda, P. Sarker, J. P. Liu, V. van Nguyen, K. Rajeshwar: *Time- and Energy-Efficient Solution Combustion Synthesis of Binary Tungstate (Ag₂WO₄, CuWO₄, ZnWO₄) Nanoparticles with Enhanced Photocatalytic Properties* ChemSusChem, 8 (2015) 1652-1663
13. G.F. Samu, K. Pencz, **C. Janáky**, and K. Rajeshwar: *On the electrochemical synthesis and charge storage properties of WO₃/polyaniline hybrid nanostructures* Journal of Solid State Electrochemistry, 19 (2015) 2741-2751

14. A. Varga, B. Endrődi, V. Hornok, C. Visy, **C. Janáky**: *Controlled photocatalytic deposition of CdS nanoparticles on poly(3-hexylthiophene) nanofibers: a versatile approach to obtain organic/inorganic hybrid semiconductor assemblies*
Journal of Physical Chemistry C, 119 (2015) 28020-28027
15. **C. Janáky**, E. Kecsenovity, K. Rajeshwar: *Electrodeposition of Inorganic Oxide/ Nanocarbon Composites: Opportunities and Challenges*
ChemElectroChem, 3 (2016) 181-192
16. E. Kecsenovity, B. Endrődi, Z. Pápa, K. Hernádi, K. Rajeshwar, **C. Janáky**: *Decoration of ultralong carbon nanotubes with Cu₂O nanocrystals: a hybrid platform for enhanced photoelectrochemical CO₂ reduction*
Journal of Materials Chemistry A, 4 (2016) 3139-3147
17. A. Kormányos, A. Thomas, M. N. Huda, P. Sarker, J. Ping Liu, N. Poudyal, **C. Janáky**, K. Rajeshwar: *Solution Combustion Synthesis, Characterization, and Photoelectrochemistry of CuNb₂O₆ and ZnNb₂O₆ Nanoparticles*
Journal of Physical Chemistry C, 120 (2016) 16024–16034
18. **C. Janáky**, D. Hursán, B. Endrődi, W. Chanmanee, D. Roy, D. Liu, N. R. de Tacconi, B. H. Dennis and K. Rajeshwar: *Electro- and Photoreduction of Carbon Dioxide: The Twain Shall Meet at Copper Oxide/Copper Interfaces*
ACS Energy Letters, 2, (2016) 332–338
19. D. Hursán, A. Kormányos, K. Rajeshwar, **C. Janáky**: *Polyaniline films photoelectrochemically reduce CO₂ to alcohols*
Chemical Communications, 52 (2016) 8858-8861
20. D. Hursán, G. London, B. Olasz, **C. Janáky**: *Synthesis, characterization, and electrocatalytic properties of a custom-designed conjugated polymer with pyridine side-chain*
Electrochimica Acta, 217 (2016) 92-99
21. G.F. Samu, Á. Veres, B. Endrődi, E. Varga, K. Rajeshwar, **C. Janáky**: *Bandgap-engineered Ternary Bi_{2-x}M_xTi₂O₇ (M: Fe, Mn) Semiconductor Nanostructures: Solution Combustion Synthesis, Characterization, and Photocatalysis*
Applied Catalysis B Environmental, 208 (2017) 148-160
22. M. K. Hossain, G. 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 (2017) 8252–8261
23. A. Sági, A. Varga, D. Dobó, G. F. Samu, B. Takács, E. Varga, Á. Kukovecz, Z. Kónya, and **C. Janáky**: *Photoelectrochemistry by design: Tailoring the Nanoscale Structure of Pt/NiO Composites Leads to Efficient Photoelectrochemical Hydrogen Evolution*
Journal of Physical Chemistry C, 121 (2017) 12148–12158
24. 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
25. B. Endrődi, G. Bencsik, F. Darvas, R. Jones, K. Rajeshwar, **C. Janáky**: *Factors governing the continuous-flow electroreduction of carbon dioxide: Benchmarking electrolyzers and their performance*
Progress in Energy and Combustion Science, 62 (2017) 133-154
26. 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 (2017) 1860-1861
27. A. Kormányos, R. Ondok, **C. Janáky**: *Electrosynthesis and photoelectrochemical properties of polyaniline/SiC nanohybrid electrodes*
Electrochimica Acta, 256 (2017) 73 -80

28. D. Roy, G. F. Samu, M. Kabir, **C. Janáky**, K. Rajeshwar: *On the measured optical band gap values of inorganic oxide semiconductors for solar fuels generation*
Catalysis Today, 300 (2018) 136-144
29. R. A. Scheidt, G. F. Samu, **C. Janáky**, P. V. Kamat: *Modulation of Charge Recombination in CsPbBr₃ Perovskite Films with Electrochemical Bias*
Journal of the American Chemical Society, 140 (2018) 86–89
30. 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 (2018) 561–569
31. B. Endródi, E. Kecszenovity, K. Rajeshwar, and **C. Janáky**: *One-step Electrodeposition of Nanocrystalline TiO₂ Films with Enhanced (Photo)-electrochemical Performance and Charge Storage*
ACS Applied Energy Materials, 2 (2018) 851–858
32. 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
33. D. Hursán, **C. Janáky**: *Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide on Nitrogen-doped Carbons: Insights from Isotopic Labeling Studies*
ACS Energy Letters, 3 (2018) 722–723
34. K. Rajeshwar, M. K. Hossain, R. T. Macaluso, **C. Janáky**, A. Varga and P. J. Kulesza: *Copper Oxide-Based Ternary and Quaternary Oxides: Where Solid-State Chemistry Meets Photoelectrochemistry*
Journal of the Electrochemical Society, 165 (2018), H3192-H3206
35. A. Kormányos, D. Hursán, **C. Janáky**: *Photoelectrochemical Behavior of PEDOT/Nanocarbon Electrodes: Fundamentals and Structure–Property Relationships*
Journal of Physical Chemistry C, 122 (2018) 13682-13690
36. A. Varga, G. F. Samu, **C. Janáky**: *Rapid Synthesis of Interconnected CuCrO₂ Nanostructures: A Promising Electrode Material for Photoelectrochemical Fuel Generation*
Electrochimica Acta, 272 (2018) 22-32
37. G. F. Samu, R. A. Scheidt, G. Zaiats, P. V. Kamat, **C. Janáky**: *Electrodeposition of Hole-transport Layer on Methylammonium Lead Iodide Film: A New Strategy to Assemble Perovskite Solar Cells*
Chemistry of Materials, 30 (2018) 4202-4206
38. A. Balog, G. F. Samu, P. V. Kamat, **C. Janáky**: *On the optoelectronic properties of CuI photoelectrodes*
Journal of Physical Chemistry Letters, 10 (2019) 259–264
39. G. F. Samu, R. Scheidt, A. Balog, **C. Janáky**, P. V. Kamat: *Tuning the Excited State Dynamics of CuI Films with Electrochemical Bias*
ACS Energy Letters, 4 (2019) 702-708
40. A. Balog, **C. Janáky**: *The effect of trap states on the optoelectronic properties of nanoporous NiO*
Journal of the Electrochemical Society, 166 (2019) H3265-H3270
41. D. Hursán, A. A. Samu, K. Artyushkova, T. Asset, P. Atanassov, **C. Janáky**: *Morphological Attributes Govern Carbon Dioxide Reduction on N-doped Carbon Electrodes*
Joule, 3 (2019) 1-15
42. G. F. Samu, A. Balog, F. de Angelis, P. V. Kamat, **C. Janáky**: *Selective Expulsion of Iodide from Mixed Halide Perovskite Films with Electrochemical Hole Injection*
Journal of the American Chemical Society, 141 (2019) 10812-10820
43. B. Endródi, 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
44. P. S. Mathew, G. F. Samu, **C. Janáky**, P. V. Kamat: *Iodine (I) Expulsion at Photoirradiated Mixed Halide Perovskite Interface. Should I Stay or Should I Go?*
ACS Energy Letters, 5 (2020) 1872–1880

45. J. He, **C. Janáky**: *Recent Advances in Solar-driven Carbon Dioxide Conversion: Expectations vs. Reality* ACS Energy Letters, 5 (2020) 1996-2014
46. A. Kormányos, E. Kecszenovity, A. Honarfar, T. Pullerits, **C. Janáky**: *Hybrid FeNiOOH/ α -Fe₂O₃/graphene Photoelectrodes with Advanced Water Oxidation Performance* Advanced Functional Materials, 30 (2020) 2002124
47. E. Kecszenovity, S. Kocheveedu, K. Horváth, JP Liu, Á. Gali, **C. Janáky**: *Solar photoelectroreduction of nitrate ions on PbI₂/CuI nanocomposite electrodes* Solar RRL, 5 (2021) 2000418
48. G.F. Samu, **C. Janáky**: *Photocorrosion at irradiated perovskite/electrolyte interfaces* Journal of the American Chemical Society, 142 (2020) 21595–21614
49. Hye Won Jeong, Wu Haihua, G. F. Samu, P. Rouster, I. Szilágyi, Hyunwoong Park, C. Janáky: *Morphology-dependent photoelectrochemical behavior of nanostructured TiO₂ films* Electrochimica Acta, 373 (2021) 137900
50. P.S. Tóth, G. Szabó, **C. Janáky**: *Structural Features Dictate the Photoelectrochemical Activities of Two-Dimensional MoSe₂ and WSe₂ Nanostructures* Journal of Physical Chemistry C, 125 (2021) 7701–7710
51. B. Endródi, A. Samu, E. Kecszenovity, T. Halmágyi, D. Sebők, **C. Janáky**: *Operando cathode activation with alkali metal cations allows high current density operation of water-fed zero-gap carbon dioxide electrolyzers* Nature Energy, 6 (2021) 439–448
52. A. Balog, G. F. Samu, S. Peto, **C. Janáky**: *The Mystery of Black TiO₂: Insights from Combined Surface Science and in situ Electrochemical Methods* ACS Materials Au, 1 (2021), 157-168
53. H. W. Jeong, T. Zsigmond, G. F. Samu, **C. Janáky**: *Sacrificial Agent Gone Rogue – Electron Acceptor Induced Degradation of CsPbBr₃ Photocathodes* ACS Energy Letters, 7 (2022) 417–424
54. E. Boutin, M. Patel, E. Kecszenovity, S. Suter, **C. Janáky**, S. Haussener: *Photo-electrochemical conversion of CO₂ under concentrated sunlight enables combining high reaction rate and efficiency* Advanced Energy Materials, 12 (2022) 2200585
55. P.S. Tóth, G. Szabó, G. Bencsik, G.F. Samu, K. Rajeshwar, **C. Janáky**: *Peeling off the surface: Pt-decoration of WSe₂ nanoflakes results in exceptional photoelectrochemical HER activity* SusMat, 2 (2022) 749-760

4. Szóbeli előadások nemzetközi konferenciákon a témában

IMRET 16, Melbourne, 2022, plenáris előadás: Continuous-flow cells and devices for electrochemical energy conversion

RSE-SEE 8, Graz, 2022, plenáris előadás: Challenges and opportunities of electrochemical CO₂ conversion: from nanoscale catalysis to industrial implementation

NanoGE MAT-SUS, Barcelona, 2022, meghívott előadás: Differences and Similarities of Electrochemical CO₂ and CO Conversion

GRC Solar Fuels, Italy, 2022, meghívott előadás: From Nanoscale Catalysis to Electrolyzer Development: Paving the Road for Industrial Carbon-Dioxide Electroreduction

241st ECS Meeting, Vancouver, 2022, meghívott előadás: Effects of the Local Chemical Environment on the Anode and Cathode Processes of CO₂ Electrolyzers

Frost8, Budapest, 2021, plenáris előadás: Electrifying the industry: Conversion of Waste to High Value Products

NanoGE 2021, online, meghívott előadás: Ion Traffic Matters: Unexpected Anode and Cathode Catalyst Behavior in Zero-gap CO₂ Electrolyzers

ECS Prime 2020, online, keynote előadás: Electrolyzer Development and Process Optimization: Paving the Road for Industrial Carbon-Dioxide Electroreduction

AiChE 3rd Annual Space Travel Conference, online 2020 meghívott előadás: Sunlight-Driven Electrochemical Conversion of CO₂ to Useful Products in Space.

FROST7 conference, Budapest, 2019, plenáris előadás: Valorization of Carbon-Dioxide via Continuous-flow Electrolysis

ACS San Diego, 2019, meghívott előadás: Hybrid Organic-Inorganic Perovskite Photoelectrodes: Photocorrosion vs. Solar Fuel Generation

235th ECS Meeting, Dallas, 2019, meghívott előadás: Rational Design of Hybrid Photoelectrode Assemblies for Solar Fuel Generation

69th Annual ISE Meeting, Bologna, 2018, meghívott előadás: Rational Design of Semiconductor/Nanocarbon Photoelectrodes for Solar Fuel Generation

EPPM3, Krakow, 2018, meghívott előadás: Lead Halide Perovskite Films as Photoelectrodes

International Symposium on Electrocatalysis, Szycrk, 2018, meghívott előadás: Opportunities Beyond Conventional Photoelectrodes: from 2D Transition Metal Chalcogenides to Lead Halide Perovskites

CIMTEC 8th Forum on New Materials, 2018, Italy, meghívott előadás: Nanocomposite Materials as Photoelectrodes in Solar Fuel Generation: Opportunities and Challenges

233th ECS Meeting, Seattle, 2018, meghívott előadás: Rationally Designed Semiconductor/Nanocarbon Photoelectrodes for Solar Fuel Generation

255th ACS National Meeting, New Orleans, 2018, meghívott előadás: Design concepts for assembling semiconductor/nanocarbon photoelectrodes employed in solar fuel generation

Gersicher Electrochemistry Today, (Boulder, USA), 2018, meghívott előadás: Opportunities Beyond Conventional Photoelectrodes: from 2D Transition Metal Chalcogenides to Lead Halide Perovskites

21st International Conference on Solid State Ionics, 2017, Padova, meghívott előadás: Design concepts of metal oxide based photoelectrodes for solar fuel generation

253rd ACS National Meeting, San Francisco, 2017, meghívott előadás: Nanostructured hybrid electrodes for photoelectrochemical CO₂ conversion: Synthetic aspects and structure-property relationships

2016 PRiME ECS Meeting (USA) meghívott előadás: Cu₂O/Nanocarbon Architectures for Photoelectrochemical CO₂ Conversion: Synthetic Aspects and Structure-Property Relationships

21st Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry, Szeged, 2017: Photoelectrochemical synthesis of conducting polymer/inorganic semiconductor assemblies

CIMTEC 2016 - 7th Forum on New Materials, Italy, 2016: Hybrid Organic/Inorganic Assemblies with Tailored Photoelectrochemical Activity: from Synthetic Aspects to Energy Applications

9th European meeting on Solar Chemistry and Photocatalysis: Environmental Applications (SPEA), 2016m Strasbourg: Rapid and Sustainable Synthesis of Metal Oxide Photocatalyst Nanostructures

Meghívott szemináriumok egyetemeken és kutatóintézetekben

ELTE (2022), TU Delft (2022), University of Toronto (CA, 2021), ELKH ATOMKI (Hungary, 2019), University of California Irvine – US National Fuel Cell Research Institute (USA, 2019 és 2022), Eötvös Lorand Universtiy (HU, 2018), University of Oulu (FI, 2018), University of Warsaw (PL, 2017), University of Notre Dame (US, 2017 és 2022), Univesity of New Mexico (US, 2017), University of Texas at Arlington (US, 2017), IIT Genova (IT, 2016), University of Sheffield (UK, 2015), University of Manchester (UK, 2015).