

HARMADIK GENERÁCIÓS NAPELEMEK

Gali Ádám

az MTA doktora, tudományos tanácsadó, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
egyetemi docens, BME Atomfizika Tanszék
gali.adam@wigner.mta.hu

A tanulmányban a napelemkutatásban és -fejlesztésben megismert trendeket, illetve fő eredményeket ismertetem, amelyek a szorosan vett napelemgyártás iparágra, illetve a globális energiatermelésre is hatással vannak. Előbb összefoglalom a napelemek alapanyagát jelentő félvezetők tulajdonságait és a napelemekben játszott szerepüket, majd kitérek a napelemek hatásfokának alapvető problematikájára, amelynek megoldása a napelemmel kapcsolatos kutatások egyik legfontosabb hajtóereje. Ez részben definiálja a napelemek röviden ismertetendő különböző generációit. Utána a legújabb kutatási eredményeket és gyártásban előforduló trendeket írom le, részletesebben kiragadva a sokat ígérő ún. töltéshordozó-többszörözés jelenségén alapuló kutatásokat.

A napelemekben az aktív részt a *félvezetők* képezik, amelyek elnyelik a napsugárzásból származó fényt, és azt árammá alakítják. A félvezetők olyan anyagok, amelyekben a vegyértéksáv energiaszintjeit töltik be az elektronok, míg a vezetési sávban az elektronok számára megengedett állapotok vannak, de alapállapotban ezeket nem töltik be elektronok. A vegyértéksáv és vezetési sáv között helyezkedik el a *tiltott sáv*; ezeken az energiaszinteken nem helyezkedhetnek el az elekt-

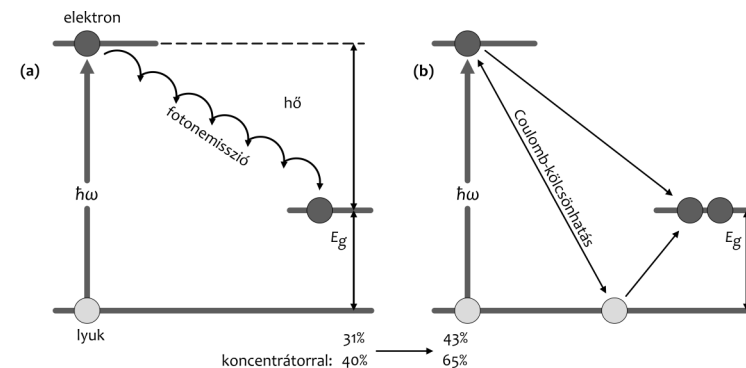
ronok. A tiltott sáv (gap) energiáját E_g -vel jelöljük (*1.a ábra*). Ha a félvezetőbe jutó fénysugár kvantumának, azaz a fotonnak az energiája meghaladja a tiltott sáv szélességét, akkor az elektront a vegyértéksávból a vezetési sávba tudja gerjeszteni. A vegyértéksávban elektronhiány jön létre, amelyet *lyuknak* nevezünk, míg a vezetési sávba egy ún. vezetési elektron kerül. Az a tipikus folyamat, hogy a vezetési elektronok a vezetési sáv aljára, míg a lyukak a vegyértéksáv tetejére jutnak a félvezető atomjainak kollektív rezgései, más néven *fononok* által. Ezeket a töltéshordozókat valamilyen beépített potenciálkülönbséggel szétválasztjuk, mielőtt azok egymást kioltják. Ezt nevezük töltéshordozó-szétválasztásnak, amelyet úgy tudunk tipikusan előidézni félvezetőikben, hogy diódastruktúrát alakítunk ki az elnyelő réteg köré.

A hagyományos napelemekben lejátszódó folyamatot az *1.(a) ábra* szemlélteti. A folyamat során egy foton egy elektron-lyuk párt kelt, amelyhez tartozó feszültség az E_g energiának felel meg. A leadott teljesítmény a fotonerjesztés által generált áram nagysága szorozva ezzel a feszültséggel. Láthatóan az E_g energiájánál nagyobb energiájú, azaz rövidebb hullámhosszú (például kék-, ibolyaszínű) fény energiáját nem tudjuk kinyerni, hanem

azt fononok nyelik el. Ezen kollektív rezgések melegítik fel a félvezető anyagot, így a beeső fény energiája ebben az esetben nagyrészt a napelemet fűti, és nem áramot termel. Az E_g -nél kisebb energiájú fényt szintén nem lehet hasznosítani. Itt figyelembe kell venni, hogy a Földre jutó napsugárzás intenzitásának van energia (vagy hullámhossz) szerinti eloszlása. Ezt az eloszlást, illetve a fenti folyamatot modellezve meg lehet találni azt az ideális félvezető anyagot, amelynek a tiltott sávja az optimális hatásfokot biztosítja. *William Shockley* és *Hans-Joachim Queisser* kiszámította, hogy a Földre jutó természetes napsugárzás esetén maximum 31% hatásfok érhető el a fenti veszteségek miatt, ha a félvezető anyag tiltott sávját optimalizáljuk, amely nagyjából 1,4 eV (elektronvolt). A fenti számításban szórt fényt feltételeztünk. Ha tükrök

vagy lencsék (*koncentrátorok*) segítségével ezerszeresére növeljük a napsugárzás természetes intenzitását, akkor is legfeljebb 40% hatásfokot lehet elérni. Ezek a számok lehangolóak. Ráadásul ezek *elméleti* értékek, amelyek nem számolnak bizonyos veszteséggel, amely például a töltéshordozók kinyerésekor léphet fel. Emiatt a piacon vásárolható hagyományos napelemek hatásfoka még ennél is lényegesen kisebb. A napelemkutatásokban a fő kihívást az jelenti, hogy a napelemcellában hogyan lehetne növelni a hatásfokot, azaz az egységnyi felületre beeső napenergiát mekkora arányban tudják elektromos árammá konvertálni.

A napelemek fejlesztéséhez szorosan kötődik a fenti fizikai határfeltétel mellett egy közgazdasági fogalom, a *hálózati árnyegnyelőség*, amely megpróbálja a különböző energiatermelési módszerek hálózati árát összehasonlí-



1. ábra • A napelemek elektromos teljesítménye a töltéshordozók (elektronok és ún. lyukak) áramától és a meghajtó feszültségtől függ. E feszültséget a napelemek félvezető alapanyagára jellemző, ún. tiltott sáv adja, amely E_g energiának felel meg. A töltéshordozókat a tiltott sávnál nagyobb energiájú fény kelti a félvezető anyagban. Felfelé álló függőlegesen nyílt: a napsugárzásból beeső magas energiájú ($h\nu$ energiával jelölve, ahol h a Planck-állandó osztva 2π -vel, és ω a beeső fény körfrekvenciája), például kék színű fény elnyelése. (a) Hagyományos félvezető anyagban az energia nagy része hőként távozik (fononok, azaz az atomok rezgései miatt). (b) Újfajta anyagokban az elektronok és lyukak erős vonzó kölcsönhatása miatt az elektronok és lyukak száma megöbbszöröződik, megnövelve az elektromos áramot és így a teljesítményt. Az elérhető *elméleti hatásfok* (%-ban megadva) növekedése koncentrátor nélkül és ezerszeres koncentrátor alkalmazásával együtt is jelentős.

tani, hogy meg lehessen nevezni, mely energiatermelési módszerek gazdaságosak. Egy évtizede azt gondolták az Egyesült Államokban, hogy a 72 cent/W ár-energia arány már versenyképessé teszi a fotovillamos energiatermelést, amelyet 2012-ben sikerült elérni. Néhány évvel ezelőtt azonban ún. *rétegrepesztés* bányászati technológiával újabb olaj- és gázmezőkhöz lehetett hozzáférni, így immár 30 cent/W-ra kell leszorítani ezt az arányt, hogy a napelemek által termelt energia nyereséges legyen. Ez a közgazdasági (és nem kifejezetten anyagtudományi) indoka annak, hogy a hatások növelése mellett cél, hogy minél olcsóbban lehessen előállítani, installálni és a villamos hálózatba integrálni a napelemcellákat és az általuk termelt villamos energiát. Az új, vagy szokatlan megoldásokkal operáló napelemcellák kutatására és fejlesztésére nagy a társadalmi igény a gazdaságosság reményében.

A napelemek fejlesztése nagyjából négy évtizede kezdődött, és a kezdetekben összeforrt a szilícium-félvezetők gyártásával. Az elmúlt négy évtizedben fejlesztett napelemeket három generációra szokás felosztani.

Az 1. generációs napelemek közé elsősorban a hagyományos napelemeket sorolhatjuk, amelyeket először a félvezetőgyártásban felgyülemelő hulladék egykristály szilíciumszeletek felhasználásával hoztak létre. A szilícium viszonylag gyengén nyeli el a Földre jutó napsugárzást, emiatt vastag réteget kell növesztetni, hogy a 20% körüli hatásfokot el tudják érni. A vastag, jó minőségű kristályréteg növesztése viszonylag nagy gyártási és installálási költséggel jár. Amorf szilíciumot használva az elnyelés hatékonynak bizonyult már vékonyrétegekben is, ami csökkentette ezeket a költségeket. Az amorfszilícium-rétegekben elérhető hatásfokot viszont a mai napig nem sikerült 14% fölé növelni.

A 2. generációs napelemek közé azokat a vékonyréteg-napelemeket soroljuk, amelyek előállítási költségét leszorítják, még ha a drágább kristályos szilícium napelemekéhez képest kisebb lesz is a hatásfokuk. Ide soroljuk tipikusan az ún. CIGS (réz-indium-gallium-diszelenid) vagy CdTe (kadmium-tellurid) vegyület-félvezetőkkel készült napelemeket.

A 3. generációs napelemek közé szoktuk sorolni az újfajta anyagokkal kísérletező kutatások és fejlesztések eredményeként létrejövő napelemeket, amelyek ígéretesek abból a szempontból, hogy egyszerre olcsók, mégis nagy hatásfokúak. Ezek közül külön ismertem a kvantumpötty vagy nanorészecske (*quantum dot*, *nanoparticle*; röviden QD és NP) szerkezeteken alapuló napelemeket, amelyek ideális esetben a Shockley–Queisser-féle elméleti határértéket meghaladó hatásfok elérésére is képesek lehetnek.

A fentiek alapján érdemes gyors összehasonlítást tenni a különböző napelemgyártók és kutató-fejlesztők által készített laboratóriumi napelemcellák hitelesített hatásfokai között. A hitelesítést a National Renewable Energy Laboratory (NREL) USA-beli megújulóenergia-kutatásokra alapított intézetben végzik, ahol az eredmények nyilvánosan elérhetőek. Hozzá kell tenni: a piacon megvásárolható napelemek hatásfoka általában 1–2%-kal kisebb, mint a laboratóriumi mintákéi. A hagyományos egyfajta félvezetőrétegből előállított maximális hatásfok szilícium esetén 25%, amelyet 2005 és 2015 között szinte semmivel sem sikerült feljebb vinni. Az Alta Device cég gallium-arszenidből (GaAs) készített olyan napelemet 2015-ben, amelynek hatásfoka csaknem meghaladta a 29%-ot. Ez hatalmas tudományos-mérnöki teljesítmény, hiszen ez a napelemcella csaknem elérte az elméleti 31%-os hatásfokot. A GaAs sokkal

hatékonyabban nyeli el a napfényt, mint a szilícium, és a tiltott sáv szélessége gyakorlatilag megegyezik a számításokban kapott optimális értékkel szemben a szilíciuméval, ezért lehetett ebből jobb hatásfokú napelemet készíteni, mint a szilíciumból. Ugyanakkor a GaAs-réteg növesztése drágább, mint a szilíciumé, és a réteg mérgező elemet tartalmaz, emiatt nagyfogyasztói energiatermelésre nem lesz alkalmazható. A nagy hatásfokú működés viszont lehetővé teszi, hogy például mobilkészülékek (tabletek, okostelefonok stb.) hátsó lapján töltőként funkcionáljon, ahol a természetes vagy mesterséges fény energiáját tudja hasznosítani. A második generációs napelemeket tekintve a First Solar cég jelentette be először 2013-ban, hogy CdTe-vékonyréteg napelemek hatásfoka meghaladta a 22%-ot, ami a piacon akkor egyedülállónak számított az olcsóbb napelemek között. A kutató-fejlesztők tovább dolgoztak a szilícium-alapú napelemcellákon, és a Panasonic cég nemrég jelentette be, hogy sikerült elérnie a 25,6%-os hatásfokot, mégpedig úgy, hogy a kristályos szilíciumot amorf szilícium réteggel zárták le, emiatt heterostrukturált szilícium napelemcellának is nevezik (angol betűszóval HIT). Ez nagyon ígéretes irány, mert egy évtized után sikerült áttörni a kristályos szilícium napelemek 25%-os hatásfokát úgy, hogy az előállítási költséget sikerült viszonylag alacsonyan tartani. A harmadik generációs napelemek közül a szerves félvezetőkkel és félvezető nanorészecskékből készült napelemek hatásfoka meghaladta a 11%-ot. Bár ez az érték jóval alacsonyabb a kristályos félvezetőkkel készült napelemek hatásfoka az elmúlt öt évben az ötszörösére ugrott. Az NP-alapú napelemek esetén a fő problémát a töltéshordozók hatékony szétválasztása és

a kontaktusokhoz vezetése jelenti, amelyek elvileg megoldható anyagtudományi és mérnöki problémák. A harmadik generációs napelemek közé sorolhatóak még a perovszkitot tartalmazó napelemek, amelyek hatásfokát először 2013-ban sikerült hitelesítve kimérni. A perovszkit napelemek laboratóriumi hatásfokát szédületes gyorsasággal néhány év alatt sikerült 22%-ra fejleszteni, de egyelőre ezen napelemstruktúrák vízgőz hatására degradálódnak, és működés közben fél órán belül töredékére esik a hatásfokuk.

A következőkben azt vizsgálom meg, milyen megoldások kecsegtetnek a Shockley–Queisser-féle 31%-os elméleti hatásfokhatár meghaladására. Az ő modelljükben három alapfeltevés volt: (1) egyfajta félvezetőréteget használunk, (2) a magasan gerjesztett elektronok gyorsan a legalacsonyabb gerjesztett energiájú állapotra csengenek le, (3) egy foton emiatt csak egy elektron-lyuk párt tud létrehozni. Az (1) feltételezést meg lehet haladni, ha több félvezetőréteget használunk, amelyek a napsugárzás spektrumából más-más energián tudják hatékonyan elnyelni a fényt. Ilyen típusú többrétegű tandem napelemcellákat állítottak már elő, amelyek hatásfoka koncentrátor nélkül elérte a 39%-ot. A tandem napelemcellák előállítása azonban drága, ezért csak költségekre kevésbé érzékeny területeken (hadipar, űrtechnika) használhatóak fel. Ezen elv egy speciális megvalósítási módosulata a köztes sávot (*intermediate band*, IB) tartalmazó napelemcellák kifejlesztése. Az IB-napelemcellákban az anyag megfelelő módosításával a tiltott sávon belül, nagyjából a sáv közepén egy félig betöltött sávot hozunk létre, amelyre a vegyértéksávból, illetve amelyről a vezetési sávba elektronokat lehet fénnel felgerjeszteni, de az elektronnak a vezetési sávról (vagy a lyuknak a vegyértéksávról) gátolt a lecsengé-

se az IB-re. Bár ezt a koncepciót több kutatócsoport próbálta megvalósítani, egyelőre nincs IB-alapú napelemcella, pedig elvileg olcsóbbak lehetnek a tandem napelemcelláknál.

A (2) és (3) feltételeket meghaladó lehetséges fizikai folyamatok egyike az ún. töltéshordozó-többszörözés magas energiájú foton gerjesztésénél, amelyet az *i. b ábra* magyaráz. Ennek az a lényege, hogy bizonyos anyagokban az elektronok közötti Coulomb-kölcsönhatás olyan erős lehet, hogy a magas energiájú elektron-lyuk pár nem fűti a napelemet, hanem helyette egy új, alacsonyabb energiájú elektron-lyuk párt hoz létre. Ez a jelenség elvileg felléphet hagyományos félvezetőkben, de ott elhanyagolhatóan kicsi a valószínűsége. *Arthur J. Nozik* jósolta meg 2001-ben, hogy félvezető NP-ben az elektronállapotok „bezáródnak”, és a bezárt elektronok között a Coulomb-kölcsönhatás annyira felerősödhet, hogy a töltéshordozó-többszörözés valószínűsége meghaladja a fononok által végigvitt lecsengés valószínűségét (hőként való disszipáció). Ez az elméleti jóslat felkeltette a kísérleti kutatók figyelmét, ennek köszönhetően az elmúlt évtized intenzív kutatásai megerősítették, hogy ez a jelenség valóban fellép bizonyos félvezető NP-kben (például ólom-szelenidben). 2011-ben publikálták a bizonyítékot arra, hogy egy adott gerjesztőenergia mellett egy fotonnal egynél több elektront lehet kinyerni egy félvezető NP-kből álló napelemcellában. Emellett *Zimányi Gergely* és munkatársai pontos kvantummechanikai számításokkal megjósolták, hogy kolloid kadmium-szelenid (CdSe) nanokristályok felületét megfelelően kezelve IB-t tartalmazó napelemcellát lehet létrehozni egyetlen félvezető anyagot, CdSe-t használva. Az IB-sáv az alacsony energiájú napfényt tudná jól hasznosítani, míg a magas energiájú napfényt a

töltéshordozó-többszörözés jelensége révén lehetne az energiatermelésbe hatékonyan bevonni. A megjósolt hatásfok eléri az 55%-ot, amelyet még egyetlen napelemtípussal sem sikerült megközelíteni, beleértve a koncentrátorok használatát. Hozzá kell tenni, hogy félvezető nanokristályok felület/térfogat aránya meglehetősen nagy, de a felületi struktúrákat egyelőre nem lehet olyan nagy pontossággal szabályozni, amekkora szükséges lenne a hatékony működéshez. Emellett a kolloid-alapú nanokristályos napelemek esetén a töltéshordozók hatékony szétválasztása és kivezetése komoly fejlesztési feladat. Emiatt érdemes alternatív anyagokat is figyelembe venni a töltéshordozó-többszörözés jelenség előidézésére. *Efstratios Manousakis* javasolta azt, hogy az ún. erősen korrelált elektronrendszerű anyagokat próbáljuk erre használni. Az ilyen anyagokban bizonyos elektronpályák között erős Coulomb-kölcsönhatás lép fel. A vanádium-doioxid egy releváns módosulata sikerült pontos számításokkal igazolni *Eric Coulter* és e tanulmány szerzőjének közreműködésével, hogy a napfény energiájának tartományában a töltéshordozó-többszörözés valószínűsége valóban meghaladja a fononok általi lecsengés valószínűségét. Az első kísérletek hasonló típusú anyagokkal már elindultak, és ez az egyik nagyon ígéretes irányzat lehet a teljesen új anyagok által segített nagy hatásfokú napelemek előállítására területén. E közlemény és a többi kutatás referenciáit a szerző kutatócsoportjának honlapján, http://wiki.kfki.hu/nano/Research:Solar_cell címen lehet megtalálni.

Kulcsszavak: *CIGS-napelem, tandem napelemcellák, perovszkit napelemek, félvezető nanorészecskék, kvantumpöttyök, töltéshordozó-többszörözés, VO₂, erősen korrelált elektronrendszer*

A NAPENERGIA PASSZÍV HASZNOSÍTÁSA ÉPÜLETEKBE

Zöld András Kerekes Attila

a műszaki tudomány doktora, ny. egyetemi tanár
profzold@yahoo.fr

tanszéki mérnök, doktorandusz
kerekesa@eng.unideb.hu

Debreceni Egyetem Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék

Fogalmi meghatározás

A szoláris termikus rendszerek három alapvető funkciója: az energia begyűjtése, tárolása és célba juttatása. A rendszer passzív, ha mindhárom funkciót maguk az épületek, azok szerkezeti látható el.

Alapesetben az energiagyűjtő elem az ablak, az energia felvételére, tárolására, leadására az épület külső és belső szerkezeti szolgál. A működés lényege az *üvegházhatás*: az ablak üvegezése (típustól függően) a nap-sugárzással érkező látható fény és rövidhullámú infravörös sugárzás 50–85%-át átengedi. Ugyanakkor a belső felületek által kibocsátott hosszuhullámú infravörös sugárzás tartományában áteresztőképessége zéró. Ilyen értelemben minden épület, amelynek van ablaka, passzív rendszer – a kérdés „csak” az, hogy mennyire jó. A szó „klasszikus” értelmében vett szoláris épületekre jó példák a Krisztus előtti évezredekétől a mai napig találhatóak.

Vannak speciális megoldások is: üvegházak, energiagyűjtő falak - a működés lényege minden esetben az üvegházhatás.

A szoláris energia minél jobb passzív hasznosítást célzó, a szó klasszikus értelmében vett szoláris épületek nem keverendők össze

- az olykor szolárisnak nevezett olyan épületekkel, amelyeknél a hasznosítás aktív

(fotovillamos, termikus) gépészeti rendszerekkel történik;

- az ún. passzívházakkal: ezt az önként vállalható minősítést minden olyan épület megkaphatja, amely két energiafogyasztási és egy légtömörégi küszöbértéknek megfelel, a napenergia-hasznosítástól függetlenül.

A passzív szoláris rendszerek értelemszerűen az épületek fűtési energiaigénye egy részének fedezésére alkalmasak. Nem mellékesen alkalmasak az épületek természetes szellőzésének serkentésére is, aminek a nyári komfortviszonyok javítása, a gépi hűtés mellőzhetősége vagy energiaigényének csökkentése szempontjából van nagy jelentősége. Természetesen a passzív rendszerek nem alkalmasak a melegvízellátás energiaigényének fedezésére vagy elektromos energia termelésére.

Minden szoláris rendszer jó működésének feltétele az energiagyűjtő felületek (ablak, kollektor, napelem) jó benapozása, árnyékmentessége, különösen a téli hónapokban.

A passzív és aktív szoláris rendszerek összehasonlítása

A passzív rendszerek talán legfontosabb sajátossága, hogy fizikai élettartamuk megegyezik az épület fizikai élettartamával, hiszen