

Szerző: Nemcsics Ákos, DSc egyetemi tanár, Óbudai Egyetem
Képek/ábrák: Nemcsics Ákos

Napelemek és nanostruktúrák

AZ ŰRTECHNIKÁRA FEJLESZTETT TECHNOLÓGIÁK
SZILÁRD TUDOMÁNYOS HÁTTERET BIZTOSÍTANAK
A FÖLDI ALKALMAZÁSÚ NAPELEMFEJLESZTÉSEKNEK

Kép: Depositphotos/maxterdesign

A globális felmelegedés, természeti környezetünk pusztulása előtérbe állítja az energiafelhasználásunk racionalizálását, amely egyrészt az energiaigény csökkentését, a felhasználás hatásfokának javítását jelenti, másrészt azt is jelenti, hogy a fosszilis energiahordozók helyett a megújuló energiák kiaknázását kell előtérbe helyoznunk.

A megújuló energiákat is osztályozzuk. A napenergia elsődleges ilyen energiaforrás, hiszen több megújuló energia is a napenergia hatására vezethető vissza. A napenergiából eredeztethető a vízenergia egy része is. A folyók felduzzasztásával nyert vízenergia a csapadékkörforgásnak köszönhető, amit a napenergia tart fenn. De ugyanígy a szélenergia egy része, valamint a felülethez közeli földhő is a napenergiára vezethető vissza. Tehát ha lehet, célszerű a primer energiaforrást használni.

A Napunk úgy működik, mint egy hatalmas fúziós reaktor, melynek energiája sugárzással jut el a Földre. A Napban hidrogén alakul át héliummá. Ez a fúzió már évmilliárdok óta működik, és a Nap anyagának döntő többségét még mindig a hidrogénatomok alkotják. Vagyis a földi élet szempontjából joggal jelenthetjük ki, hogy a Nap kimeríthetetlen energiaforrásunk.

A napenergiát többféleképpen is hasznosíthatjuk. Napkollektorral termikus átalakítás történik, például vizet melegíthetünk vele, vagy koncentrátoros megoldással

például napkohót működtethetünk, vagy termelhetünk gőzt turbinahajtásra. Van egy nagyon alkalmas elektronikus eszköz, az úgynevezett napelem, melyre ha rásüt a Nap, villamos energia termelődik. Itt kell megjegyeznünk, hogy a villamos energia a legsokoldalúbban fel-

A napenergiát többféleképpen is hasznosíthatjuk.

használható energiafajta. A termikus energiából csak nagy veszteséggel állítható elő elektromos, optikai vagy mozgási energia. Az elektromos energiára ez nem igaz. Ráadásul a napelem gondozásmentes eszköz, nincsen benne mozgó alkatrész, ami elkophatna. A napelem egy tartós félvezető eszköz, amely élettartamát, kivitelét tekintve kiválóan alkalmas építőipari felhasználásra is.



A műholdak, az űrállomások energiaellátását napelemek biztosítják, ami a világűrben különösen nagy segítség, mivel itt egyetlen folyamatos energiaellátást a napsugárzás biztosít. |Kép: Depositphotos/cookelma

A világűrben különösen nagy segítség, mivel itt egyetlen folyamatos energiaellátást a napsugárzás biztosít. A műholdak, az űrállomások energiaellátását napelemek biztosítják. Az űrkutatás komoly tudományos háttérrel dolgozik. Ez megmutatkozik az egyre ellenállóbb és egyre nagyobb hatásfokú napelemek megjelenésében is. Ahogy az űrkutatás számára kifejlesztett teflon és más dolgok, úgy a világűri napelemek is megjelentek a földi alkalmazásban. Tehát a földi alkalmazású napelemfejlesztéseknek erős hátszelet ad a tudományosan és financiálisan kellően megtámogatott űrbéli megfelelője.

A napelem működése és fajtái

A napelem működését a legegyszerűbben egy pn-átmenet segítségével magyarázhatjuk el. A pn-átmenetről röviden: az anyagokat elektromos szempontból osztályozhatjuk fémek, félvezetők és szigetelők szerint. A fémek vezetnek az elektromosságot; a szigetelők nem vezetnek. A félvezetők bizonyos körülmények között vezetnek vagy nem vezetnek. Ha visszaemlékszünk a fizikaórán tanultakra, tudhatjuk, hogy az atommagok körül energiaszintek vannak, amikben lehetnek elektronok, de lehetnek üresek is. Egy sokatomos szilárdtestben ezek az energianívók – a Pauli-elvnek megfelelően – sávokká szélesednek. A betöltöttség és a betöltetlenség határán történnek a fontos dolgok. Ha a maghoz közelebbi betöltött és a távolabbi betöltetlen sávok átlapolnak, akkor az anyagok jól vezetnek az elektromosságot. Azokat nevezzük fémeknek. Tehát a legkülső elektronok szabadon mozognak az anyagban.

Ha ezek a sávok nagyon távol vannak egymástól, akkor az elektronok mind kötöttek, nincs remény, hogy a kötöttből a szabadabb állapotba kerüljenek. Ezek az anyagok nem vezetnek, ezeket nevezzük szigetelőknél. Ha ezek a sávok megfelelően közel vannak egymáshoz, akkor bizonyos behatásokra vezetővé válhatnak. Elektron kerülhet a betöltött nívóból a betöltetlenbe. Ezeket az anyagokat nevezzük félvezetőknek. A félvezető-tulajdonságok tovább módosíthatók adalékolással. Ha olyan anyaggal adalékolunk, amelynek eggyel több a vegyértékelektronja, mint a befogadó anyagnak, akkor ebből válik az elektronvezetésű n-típusú félvezető. Ha az adalék atomoknak eggyel kevesebb a vegyértékelektronjuk, mint



A legismertebb félvezető a szilícium. Ebből vannak a mikroprocesszorok, de az első napelemeket is ebből az anyagból készítették. |Kép: Depositphotos/Fireflyphoto

a befogadó anyagnak, akkor ebből lesz az elektronhiányvezetési p-típus. Ezeket szorosan egymás mellé téve jön létre a fent említett pn-átmenet, azaz a dióda. A napelem ilyen tekintetben egy speciális dióda. Megvilágítás hatására szabadon mozgó töltéshordozók generálódnak benne, amit a pn-átmenet elektromos erőtere szétválaszt.

A napelemfunkció alapvető része, hogy generálható legyen benne töltéshordozó.

Az elektronokat az egyik oldalra, az elektronhiányokat a másik oldalra tereli. Kivezetéssel ellátva az eszköz úgy működik, mint egy galvánelem. A legismertebb félvezető a szilícium. Ebből vannak a mikroprocesszorok, de az első napelemek is ebből az anyagból készítették. Azóta más anyagok is teret nyertek. A fentieket összefoglalva: a napelemfunkció alapvető része, hogy generálható legyen benne töltéshordozó, akár kétféle. A másik a beépített tér, amely a generálódott töltéseket szétválasztja, amit később a kivezetéseken keresztül munkára lehet fogni. Tehát általánosságban véve nem szükséges konkrét pn-átmenetes félvezető hozzá. Használhatunk hasonló működésű anyagot, átmenetet. A töltéshordozó generálódás alapja lehet nemcsak félvezető, de lehet elektrolit, vezető polimer stb. A beépített tér származhat ezen anyagok különböző átmeneteiből. Így készülhet a sátorponyvára integrálható hajlékony, polimeralapú napelem, de így készülhet – munkaponttól függően – elektromosságot vagy hidrogént termelő elektrokémiai napelem vagy a világűrben használt fantasztikus hatásfokú galliumarzenid-alapú napelem.

Intézményünkben negyedszázados a napelemoktatás

Az Óbudai Egyetem egyik jogelődjében, a Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskolán 1999-ben vezettek be egy teljes szemeszteres napelemes kurzust. Az oktatáshoz tankönyv is készült, melyet néhány évvel később – bővített formában – az Akadémiai Kiadó is megjelentetett. Ma a napelemek alkalmazásának fontossága környezetvédelmi szempontból evidencia. Ám huszonöt évvel ezelőtt igencsak úttörő kezdeményezésnek számított egy ilyen tantárgy bevezetése. Azóta több felsőoktatási intézmény is a programjába vette a napelemek oktatását, de az általunk indított tantárgy mindmáig az egyetlen teljes féléves oktatás ezen a területen. A tankönyv több kiadást is megért. (A covid-járvány idején elkészült az interneten elérhető verziója is.) A tankönyv része a *Műszaki ökológia* című tankönyvsorozatnak, melynek logója egy villáskulcsokból formázott fa, melynek lombkoronáját anyacsavarok alkotják. Ez látható a könyv borítóján is.

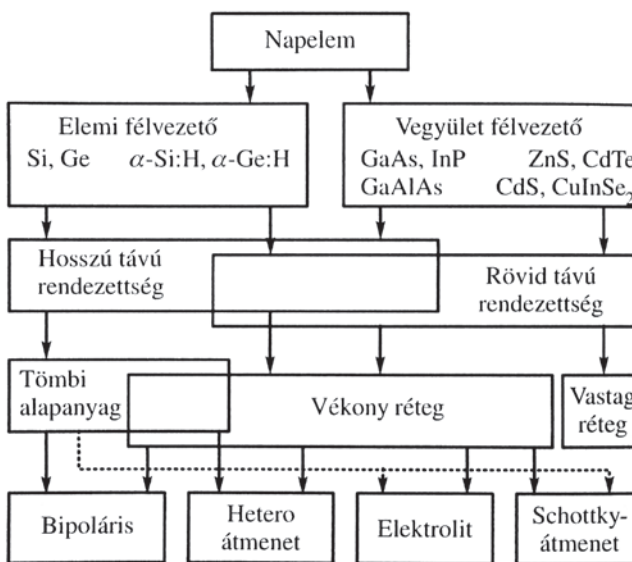
A tananyag átfogja a teljes szakmai területet. A napenergia hasznosítása felhasználható aktív és passzív módra. A légkollektoros és üvegházhatáson alapuló építészeti megoldásokon át gépészeti napkollektoros hasznosítás is szóba kerül. Ezután következik a fotovoltai hatás



Az első magyar nyelvű napelemes szakkönyv, amelyet néhány évvel később az Akadémiai Kiadó is megjelentetett.

és a napelem felépítésének kifejtése. A napelem is egy olyan félvezető eszköz, mint a dióda vagy a tranzisztor, csak a méretei nagyobbak, és a technológiája eltérő. A tárgyalás az egyetemi fizikaoktatásra épül. A fizika- és elektronika-oktatás a félvezetők tilosságját ismerteti, de annak szerkezetét nem taglalja. Itt jelentősen túllépünk a korábbi ismereteken, hiszen ebben az esetben egy optikai eszközről van szó, melynek működését alapvetően befolyásolja a félvezető energiasáv-struktúrája. Tárgyaljuk a direkt és indirekt félvezetőket. A megértésnél az egyszerű pn-átmenetes struktúrát vesszük alapul. Tárgyaljuk az eszköz karakterisztikáit, a kitöltési tényezőt, a hatásfokot stb.

A következő fő részben a napelemfajtákat és technológiájukat vesszük sorra. A napelemeknek igen sok fajtája van, az eligazodást egy *diagram* segíti. Vannak a tömbi anyagon készültek és vannak a vékonyréteg-napelemek. Az alpanyagot tekintve vannak az elemi félvezetők és a vegyület-félvezetők közül készültek. A diagram ezeket

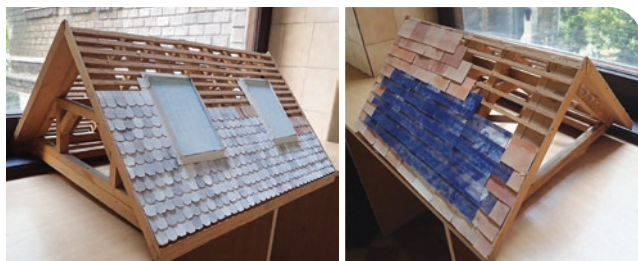


A napelemfajtákat rendszerező diagram.

is és a további osztályozási kritériumokat is tartalmazza. A kristályos szilícium alapú a legismertebb. A polikristályos az alapanyag-technológiában tér el. Az előállítás jóval egyszerűbb, míg a hatásfokban csak minimális a csökkenés. A vékonyréteg-napelemek legismertebb képviselője a hidrogénezett amorf szilícium napelem. A speciális sávszerkezetnek köszönhetően ennek az abszorpciós tulajdonságai kiválóak. E tulajdonságok eredményeként a napszakra és a meteorológiai viszonyokra kevésbé érzékeny struktúráról van szó.

Napjainkban egyre inkább feljövőben van a kalkogénid alapú napelemek kutatása, gyártása és alkalmazása. Itt a CuInGaSe_2 (réz-indium-gallium-diszelenid) és hasonló napelemeket tárgyaljuk. A napelemek között különleges helyet foglalnak el a GaAs (gallium-arzenid) és rokon anyagokból készülő napelemek. Az anyag tökéletes a napenergia-konverzióra. A világűrbe ma már csak ilyen típusú napelemeket lőnek fel. Ezekről külön fejezetben lesz szó. A napelemfajták között tárgyaljuk még az elektrokémiai napelemet, amellyel nemcsak elektromosság, hanem hidrogén is előállítható, mellyel potenciálisan a hosszú távú energiatárolás problémája lenne megoldható. Tárgyaljuk még a polimeralapú napelemeket, ezzel az igen vékony és hajlítható hordozóra felvihető napelemstruktúrákat is.

A tantárgy tematikájának harmadik nagy területe az alkalmazásoké. A napelemes rendszereket használhatjuk szigetüzemmódban és hálózatra kapcsolt módban is. Az előbbinél az akkumulátortöltést kell megoldani, ahol az időjárás- és napjárásfüggő kimeneti teljesítményváltozás az adottság. Míg a második esetben a váltakozó áramú hálózatra kell csatlakoznunk egy inverteren keresztül. Ezek áramköri megoldása szintén mérnöki feladat. Az alkalmazások esetén a napelem kerülhet tetőre, zajvédő falra stb. Az építészeti alkalmazások között külön kategória a homlokzatra kerülő, úgynevezett függönyfalas megoldás. Napelem kerülhet magas- és lapostetőre egyaránt. A magastetős megoldásnál lehetséges az átszellőztetett elrendezés. Héjazatként is használható. Érdekes irány a pikkelyfedésként alkalmazás.



Építészeti alkalmazás, balra: magastetőn, héjazat szintjébe installált napelemtábla, jobbra: pikkelyfedéssel kompatibilis napelemfedés.

Általában nem szokták tárgyalni, de igen fontos szempont az esztétika. A napelemek utólagos installálása mellett egyre inkább terjed, hogy napelemmel tervezik az épületet. A napelem, ugyanúgy, mint például bármely szilikátipari termék, építőeleme egy lehetséges háznak. Ha az építész esztétikusnak találja, beletervezi a házba. Itt kell megemlíteni az amorf szilícium napelemet, amely semleges, szép felületével kiváltképp alkalmas erre a feladatra.

A napelemek között különleges helyet foglalnak el a gallium-arzenid és rokon anyagokból készülő napelemek.

Hazai vonatkozásban egy igen lényeges szempontot kell megemlíteni: a hallgatóink nemcsak elméleti oktatást kaptak-kapnak, hanem projektmunkákban is részt vettek, illetve részt vesznek. Mivel nemzetközi, de hazai viszonylatban mindenképpen nagyon korán kezdtünk el foglalkozni egy átfogó napelemes oktatással, így leginkább tőlünk kerültek ki a szakemberek az egyre szaporodó hazai cégekbe, illetve azok vezetőségébe. És itt kell szólnunk még arról is, hogy néhány éve – több szakember bevonásával – elindult egy napelemes szakmérnöki képzésünk is.

Napelem a világűrben és más projektek

Ahogy a fentiekben már említettük, manapság kizárólag GaAs-alapú napelemeket juttatnak ki a világűrbe. A periódusos rendszer III. és V. oszlopába tartozó anyagokból, összetételük arányait megváltoztatva, hatalmas félvezető család alakítható ki. Ezek a természetben nem megtalálható mesterséges vegyületek, melyek a gyémánthoz nagyon hasonló struktúrákban kristályosodnak. Fizikai tulajdonságaik szinte ideálisak a napenergia-konverzióra. Ebből az anyagból a legegyszerűbb pn-átmenetes struktúra hatásfoka is messze túlszárnyalja az eddig létező legszofisztikáltabb egyéb anyagokból készült napelemek hatásfokát. Ha alacsony dimenziós vagy főleg nulladimenziós nanostruktúrát építünk bele, a hatásfok igen magasra emelhető. Itt kell megjegyeznünk azt a fontos tény, hogy a nanostruktúrák beépítésével az előállítási technológia költségigénye nem változik. Amint azt a későbbiekben bemutatjuk: az egyre bonyolultabb, azaz nagyobb hatásfokú struktúrák előállítása során csak a technológia programja változik. Sem a berendezés, sem az alapanyagok, sem az előállítás energia- és időigénye nem változik.

A III.-V. anyagok (például: GaAs, AlAs, InP, InGaAs, AlAsP, InGaAs stb.) családjának tipikus képviselője a GaAs. Ennek tilossávja és sávátmenete éppen ideális a napenergia konverziójára. A napelemek viszonylag alacsonyabb hatásfoka általában abból adódik, hogy definíció szerint az előállított elektromos energiát a beeső sugárzás teljes spektrumára normáljuk, míg az érzékenység az alapanyag tilossávjához kötődik. Különböző tilossávú anyagok

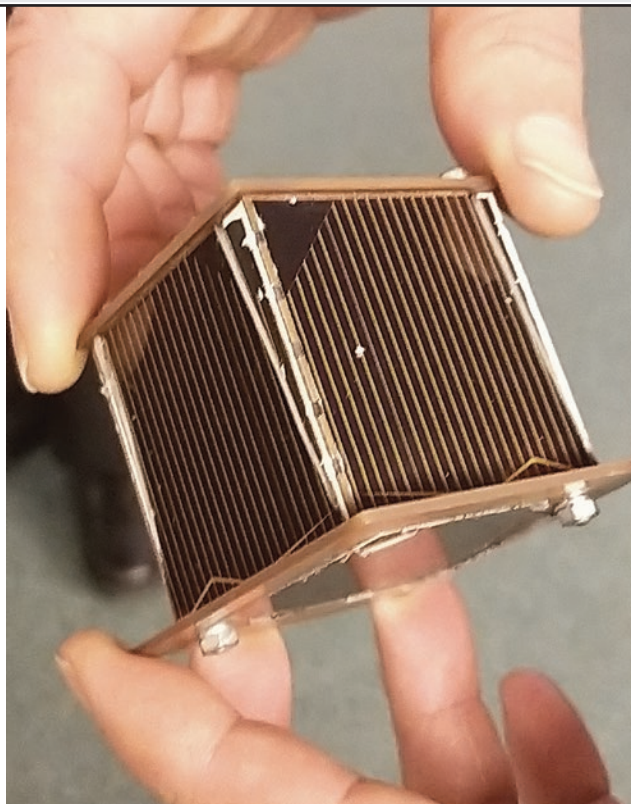
A nanostruktúrák beépítésével az előállítási technológia költségigénye nem változik.

összeintegrálásával növelhetjük a spektrálérzékenységet, de ezzel drasztikusan bonyolultabb és drágább lesz a technológia is. A III.-V. anyagok nagy előnye az azonos technológia, valamint nagyon precízen tudunk belőlük építkezni. A precizitás teszi lehetővé, hogy reprodukálható

módon, nanoméretű rétegeket és más nanoobjektumokat hozunk létre. Ez az atomréteg-pontosságú precizitás teszi lehetővé, hogy – kvantumfizikai jelenségeket kihasználva – optikai értelemben tetszőleges anyagokat állíthassunk elő a maximális spektrálérzékenység elérése érdekében.

Az előállítás epitaxiás technológiával történik. Ennek a technológiának alapvetően három típusa van: a folyadékfázisú, a gázfázisú és a molekulásugaras. Mi ez utóbbival foglalkozunk. A berendezés egy növesztő vákuumkamrából és több kisebb kamrából, molekulaforrásokból és *in situ* mérőeszközből áll. A források felett blendék vannak, amelyek szabályozzák a fűtött hordozóra jutó atomok, molekulák áramlását. Az egész berendezés számítógépvezérelt. A hallgatóink közreműködésével készült el a szenzorokkal, léptetőmotorokkal ellátott teljes körű vezérlés. A növekedés *in situ* módon, az elektrondiffrakció fluoreszcens ernyőn való videokamerás megfigyelésével történik. Hallgatóink munkáját dicséri a teljes körű elektronikus naplózás is. A fentiek alapján már világos, hogy egy homogén réteg vagy egy nanostruktúrát tartalmazó réteg előállítása „csak” a berendezés felprogramozásának kérdése. Természetesen ezt hosszú és alapos tudományos munkának kell megelőznie. A fentiek alapján nem meglepő, hogy a berendezésfejlesztés területéről meglehetősen sok hallgatói szakdolgozat, diplomamunka született.

A nemzetközi felsőoktatási intézmények közötti nemes versengés része a világűr meghódítása is. A világűrbe kilőtt első hallgatói műholdkockák (CubeSat) viszonylag nagyobb méretűek voltak, melyeket – az energiaellátást biztosítandó – szilícium napelemmel borítottak. A mai szabvány 5 centiméter élhosszúságú kocka (PocketSat). A nagyobb integráltság és kisebb felület nagyobb hatás-



Gallium-arszenid-alapú napelemmel fedett műholdkocka.

fokú napelemet igényel. A műegyetemi vezetésű projektbe felkérés alapján kerültünk be, ugyanis GaAs-alapú technológiával, napelemekkel hazai viszonylatban csak mi foglalkozunk. Sikeres részvételünket az is erősíti, hogy a mi műholdunk maradt odafent a legtovább működőképesen, valamint más országok csapatai is igényt tartottak a napelemes közreműködésünkre.

A tantárgyhoz más hallgatói projektek is kapcsolódtak. Feltétlenül meg kell említeni, hogy a tantárgyunk bevezetésével szinte egy időben jelent meg a fővárosban egy magyar kötődésű szabadalmon alapuló amorf szilícium napelemgyár. A telepítés után a gyártás beindulását még évekig tartó fejlesztések, kísérletek előzték meg. Itt nagyon jó szakmai kapcsolatokat ápolunk. Hallgatói üzemlátogatások mellett bekapcsolódtunk a fejlesztésekbe; szakdolgozatok készültek a témából, valamint végzett hallgatóink itt tudtak elhelyezkedni. Hasonlóan jó kapcsolatokat ápolunk más hazai napelemgyártó és napelem-összeszerelő üzemekkel.

Hallgatói projektek kötődtek alkalmazásokhoz is. Vezérlő, töltő és inverter kapcsolások tervezése és megvalósítása több sikeres szakdolgozat témája volt. Családi házas és ipari méretű napelem-installálási feladatokat oldottak meg hallgatóink, és ezek alapján több szakdolgozat is született. Az utóbbi néhány évben a zöldmezős napelemerőművek elterjedését tapasztalhattuk meg. Kézenfekvőnek látszott ezek – nem mindig üdvözlendő – építési folyamataiba is betekintést nyerni.

A napelemanyagokkal kapcsolatos területen hazai és nemzetközi tudományos kapcsolatokat ápolunk egyetemekkel, kutatóintézetekkel. Összegezve a fentieket, kijelenthetjük, hogy az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karának Mikroelektronikai Tanszéke megkerülhetetlen tényezője a hazai napelemes kultúrának. ■

Hallgatói fejlesztésekkel megvalósult molekulásugar-epitaxiás (nanostruktúrák rétegépítésre alkalmas) berendezés.

