



ÓBUDAI EGYETEM

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

Villamosenergetikai Intézet

SAKDOLGOZAT

ÓE-KVK

Hallgató neve: Bakos Boldizsár

2021.

Hallgató törzskönyvi száma: T007129/FI12904/K



SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Bakos Boldizsár Béla

Szakdolgozat száma: SZD21090213453945

Törzskönyvi száma: T007129/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)

Specializáció: Villamosenergetikai specializáció

A dolgozat címe: Fotovillamos (PV-) modulok biztonságtechnikai minősítése

A dolgozat címe angolul: Safety certification of photovoltaic (PV) modules

A feladat részletezése: 1.) Fotovillamos (PV-) modulok fajtáinak bemutatása

2.) Fotovillamos (PV-) modulok MSZ EN IEC 61730 szerinti minősítési követelményeinek bemutatása

3.) Önálló kísérlet elvégzése

4.) Méréskiértékelés, dokumentáció

Intézményi konzulens neve: Varga Zoltán

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 12. 15.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

Varga Zoltán

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2021.12.15.

.....
hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

Bevezetés	6
1 Félvezetők előállítása, kémiai tulajdonságaik	8
1.1 Félvezetők szennyezése	10
1.2 Fényelnyelés.....	11
1.3 Abszorpciós együttható, abszorpciós mélység.....	12
1.4 Termelési arány, rekombináció	14
1.5 Töltéshordozók mozgása a félvezetőkben	15
1.6 P-N átmenet létrehozása.....	15
1.7 Szilícium előállítása	16
1.8 Waferek felületkezelése	18
2 Napelemek működése, felépítése és típusai	21
2.1 Napelemek felépítése	22
2.2 Napelemek típusai	23
2.3 Lakossági felhasználású napelemes rendszer részei	25
2.4 Napelemek tájolása	26
3 Az IEC61730 szabvány bemutatása	28
3.1 Osztályokba sorolás, alkalmazások, tervezett használat	29
3.2 0. érintésvédelmi osztályú modulok.....	29
3.3 II. érintésvédelmi osztályú modulok	29
3.4 III. érintésvédelmi osztályú modulok.....	30
3.5 Áramütés elleni védelem.....	31
3.6 Fotovillamos modulok szerkezeti részeivel szemben támasztott követelmények	31
3.7 Villamos csatlakozásokkal, összeköttetésekkel szemben támasztott követelmények	33

3.8	Bypassdiódákkal, vezetékekkel szemben elvárt követelmények	34
3.9	Fotovillamos modulok szállítása, összeállítása.....	34
4	Kísérlet ismertetése	36
4.1	Első mérés eredményeinek ismertetése.....	39
4.2	A második mérés eredményeinek ismertetése	42
4.3	Mérés kiértékelése.....	44
5	Összefoglalás.....	45
6	Thesis Summary	47
7	Irodalomjegyzék	49

BEVEZETÉS

Szakedolgozatomban a fotovillamos modulok típusait, gyártásukhoz szükséges kémiai elemek előállítását, biztonságtechnikai minősítésüket, ezen modulok gyártási folyamatát, továbbá az MSZ EN IEC 61730 szabvány szerinti minősítési követelményeit, valamint az általam végzett napelemes mérések összeállítását, a mérések eredményét és az ebből levont következtetéseket mutatom be.

Az emberiségnek évről évre több és több energiára van szüksége. Ennek az egyik fő oka a Föld népességének folyamatos növekedése, a feltörekvő országok gyors fejlődése, melynek köszönhetően az adott országgal együtt az ott élő emberek is gazdagodnak, ezáltal nő az elektromos berendezések iránti kereslet, így nőnek az energiaigények is.

2000-ben az emberiség villamos fogyasztása 122073 TWh [1] volt, melyből mindössze 8090 TWh származott megújuló energiaforrásokból. 2019-ben ugyan ez a villamos fogyasztás adat már 173340 TWh volt és 18545 TWh-t fogyasztottunk megújuló energiaforrásokból. Megfigyelhetjük, hogy közel 20 év alatt az emberiség fogyasztása majdnem másfélszeresére nőtt, továbbá megfigyelhető hogy a megújuló energiaforrásokból előállított energia majdnem 2,5-szeresére nőtt. A megújuló energiaforrások térnyerésének több oka van.

2009-ben jelentősen olcsóbb volt fosszilis erőművet építeni, mint naperőművet vagy szél erőművet. A szélenergia ára 22%-al, a napenergia 223%-al volt drágább a szénenergiához képest [2]. Az első napelemes erőművek beruházása, megépítése és fenntartása drágának mutatkozott, de ennek ellenére is alkalmazták őket. A legelső gyakorlati felhasználás 1958-ban történt a Vanguard-1 műhold energiaellátásra használták. Az idő múlásával egyre több és több napelemet gyártottak a magas árak ellenére is. A technológia és technika fejlődésével a félvezetőipar, köztük a napelemek előállításának költsége is csökkent. Az árak csökkenésével megnőtt az érdeklődés a napelemek iránt, aminek köszönhetően újra fejlődött a gyártási technológia, így egy nagyon hasznos körforgás vette kezdetét. Hamar elterjedt a napelemek háztartásszintű alkalmazása is, azon felül, hogy egy hosszú távon

megtérülő befektetésről beszélünk gyakran járnak állami támogatások, adókedvezmények is a háztartási méretű napelemrendszert létesítőknek, ezzel is növelve a napelemek népszerűségét.

A fosszilis erőművek üzemeltetésének költségei két tényező alapján alakulnak: az energiahordozó árán, amit elégetnek és az erőmű működtetési költségeken. A megújuló energiaforrásokat felhasználó erőművekhez nem kell energiahordozót vásárolni és a működtetési költségeik is alacsonyak, ugyanis, itt maga a technológia ára az, ami meghatározza az egész erőmű árát [3]. Napjainkban a napenergia a legolcsóbb energia, míg 1976-ban 1 Watt napenergia 106\$-ba került, ma 0,38\$-ba kerül [4].

A megújuló energiaforrások térnyerésének ellenére is 2019-ben az előállított energiának 84%-a fosszilis tüzelőanyagokból (szén, kőolaj, földgáz) származott [5], aminek nagy szerepe van az éghajlatváltozásban, globális felmelegedésben. A Föld hőmérséklete a Napból érkező sugárzások és a Föld által az űrbe sugárzott energia egyensúlyának köszönhető. A Föld által sugárzott energiát erősen befolyásolja a Föld légköre és annak összetétele. Az átlaghőmérséklet -18°C lenne, ha nem lenne a Földnek légköre. A légkörben lévő természetes CO_2 szint elnyeli a Föld által kibocsátott sugárzások 30%-át, így ez az energia a légkörben marad és melegíti a Földet, a sugárzások maradék 70%-a nem marad a légkörben [6]. Az emberi tevékenységeknek köszönhetően a légkörbe kerülő antropogén gázok meggátolják ezen sugárzások kilépését a légkörből, ami a Föld átlaghőmérsékletének felmelegedésével jár. Az üvegházhatású gázok $\frac{3}{4}$ -e az energiatermelésből származik [7].

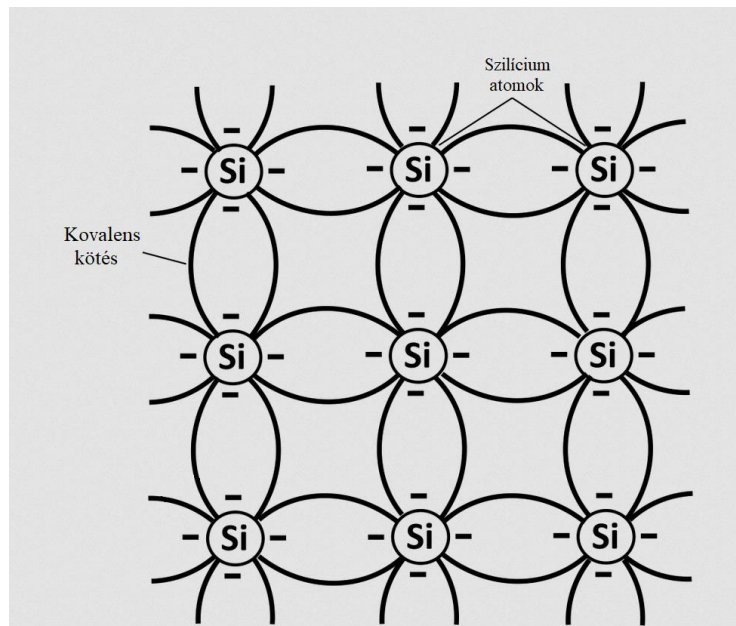
Dolgozatom célja, hogy bemutassam és ismertessem az MSZ EN IEC 61730 szabványnak a napelemekkel és a telepítésükkel, karbantartásukkal szemben támasztott követelményeit, valamint, a szabványban megfogalmazott mérési körülmények mellett bemutassak egy napelemes mérési kísérletet és a kísérletekből származó eredményeket ismertessem, következtetéseket vonjak le.

1 FÉLVEZETŐK ELŐÁLLÍTÁSA, KÉMIAI TULAJDONSÁGAIK

Annak érdekében, hogy teljes mértékben ismertetni tudjam a napelemek felépítését és működését először a félvezetőket és előállításuknak folyamatait fogom bemutatni.

Félvezetőket számos területen alkalmaznak, felhasználásuk azért ennyire elterjedt, mert könnyű megváltoztatni a vezetőképességüket. A vezetőképesség növelésének egyik módja, hogy más atomokkal adalékolják a félvezetőket. A vezetőképesség megváltoztatható úgy is, hogy a félvezető egyik felébe áramot vezetünk, ezzel nagymértékben megváltozik a vezetőképesség a másik felén [8]. A félvezető anyagok a periódusos rendszer több csoportjában találhatóak, ennek ellenére tulajdonságaikban sok hasonlóságot figyelhetünk meg. Ezen tulajdonságok az anyag atomi jellemzőitől és a periódusos rendszerben elfoglalt helyzetétől (mely csoportban helyezkedik el) függ. A félvezetőket alkotó atomokat a periódusos rendszer II. – VI. csoportjaiban találhatjuk meg. A legelterjedtebb félvezető alapanyag a szilícium, mely a IV. csoportban található. A szilícium képezi az integrált áramkörök alapját és a legtöbb napelem is szilícium alapú. A továbbiakban kifejezetten a szilícium alapú félvezetőket fejték ki részletesebben [9].

Az atomok protonokból és nukleonokból, azaz elektronokból és neutronokból állnak, amelyek az atommagot alkotják. Az elektronok és a protonok száma megegyezik, ezért elmondható, hogy az atom elektromosan semleges. Az elektronok, melyek körülveszik az atomokat egy kovalens kötés részei. A kovalens kötés két atomból áll, melyek osztoznak egy elektronpáron. Minden atom négy kovalens kötést alkot, az azt körülvevő másik négy atommal, így az atomok között nyolc elektron kerül megosztásra [10].



1. ábra Kovalens kötés a szilícium kristályrácsban [11]

A kötésszerkezet határozza meg a félvezető anyagi tulajdonságait. A legfontosabb jellemzők az energiaszint, amit az elektronok elfoglalhatnak, és hogyan mozognak a kristályrácsban. Az elektronokat a kovalens kötés tartja a helyükön, ezért az atom körül helyezkednek el. Nem tudnak mozogni, energiát változtatni, ennél fogva nem szabadok, így nem tudnak részt venni az elektromos áramlásban. Szerencsénkre az elektronok csakis abszolút nulla fokon ragadnak be a kötésbe. Magasabb hőmérsékleten, kifejezetten a napelemek üzemi hőmérsékletén az elektronok elég energiára tehetnek szert ahhoz, hogy kiszabaduljanak ebből a kötésből. Ha ezek a feltételek adottak, az elektronok szabadon mozoghatnak, így részt tudnak venni az elektromos áramlásban. Szobahőmérsékleten egy félvezetőnek elég szabad elektronja van ahhoz, hogy vezetőként viselkedjen. Abszolút nulla, vagy ehhez közeli hőmérsékleten a félvezetők szigetelőként funkcionálnak [12].

Amikor egy elektronnak elég energiája lesz ahhoz, hogy részt vegyen az elektromos áramlásban, akkor magas energiaállapotban van. Ennél fogva a kötés jelenléte két atom között két különböző energiaállapotot eredményez az elektronoknak. Az elektron nem lehet a két energiaszint között, vagy kötésben van, vagy elegendő energiája van ahhoz, hogy kitörjön a kötésből. Viszont ehhez

szükséges egy minimális energia, ezt a minimális energiát nevezzük a félvezető sávközének. Tehát a sávköz az a minimális energiaváltozás, ami az elektron gerjesztéséhez szükséges, hogy az részt vehessen az elektromos áramlásban. Az elektronok elmozdulásakor hátrahagyott helyet lyuknak nevezzük, ami hasonló az elektronhoz, de pozitív töltéssel rendelkezik. A keletkezett lyukak lehetővé teszik, hogy elmozduljon feléjük egy új elektron a szomszédos atomról. Amikor ez az elektron elmozdul ez is egy lyukat hagy maga mögött és így tovább. Ezt a folyamatot leírhatjuk úgy, mint egy pozitív töltésű részecske mozgását a kristályszerkezetben. Tehát egy elektronnak a vezetési sávba való gerjesztése nem csak egy szabad elektront eredményez a vezetési sávban, hanem egy lyukat is a vegyértéksávban, így az elektron és a lyuk is részt vehet a vezetésben. A félvezető legfontosabb paraméterei napelemes felhasználásnál:

- Sávköz
- Szabad vezetők száma (elektronok, lyukak)
- Szabad vezetők képződése, rekombinációja fény hatására [12]

Belső hordozóknak nevezzük azokat az elektronokat és lyukakat, amelyek részt vesznek az elektromos áramlásban. A félvezető termikus gerjesztése mind a vegyértéksávban, mind a vezetősávban szabad hordozókat hoz létre. Ezen hordozók száma az anyag sávközének nagyságától és hőmérsékletétől függ. A nagy sávköz megnehezíti a szabad hordozók termikus gerjesztését, ezért a belső hordozókoncentráció alacsonyabb a nagyobb sávközű anyagokban.

1.1 Félvezetők adalékolása

A szilícium kristályrácsban fel lehet borítani az elektronok és a lyukak egyensúlyát szennyezőatomokkal. Az olyan atomokat, melyeknek eggyel több vegyértékelektronjuk van, mint a szilíciumnak n-típusú félvezetők gyártására használják. Ezek az n-típusú anyagok a periódusos rendszer V. csoportjának elemei, tehát az atomjaiknak öt vegyértékelektronjuk van, amik képesek kovalens kötést alkotni a szilícium négy vegyértékelektronjával. Mivel négy vegyértékelektronra van

szüksége minden atomnak ahhoz, hogy kovalens kötést létesítsen a szilícium atom körül, ezért a két atom közötti többlet vegyértékelektron szabadon részt vehet a vezetésben, így megnő a jelenlévő szabad elektronok száma.

Azokat az atomokat, melyeknek eggyel kevesebb vegyértékelektronjuk van, mint a szilíciumnak p-típusú félvezetők gyártására használják. Ezek a p-típusú anyagok a periódusos rendszer III. csoportjának elemei, tehát három vegyértékelektronnal rendelkeznek. Ezek kölcsönhatásba lépnek a szilícium atomjaival, aminek az eredménye egy lyuk lesz, hisz nincs elegendő elektron ahhoz, hogy négy kovalens kötést létesítsen minden atom közt. A p-típusú anyagokban több olyan elektron van, melyek a kötésekben rekedtek, ezzel növelve a lyukak számát.

A szennyezett anyagban mindig több van az egyik típusú hordozóból, mint a másiktól. Azt amelyikből több van többségi hordozónak, amelyikből kevesebb kisebbségi hordozónak nevezik. Az n-típusú félvezetőket azért hívjuk n-típusúnak, mert negatív töltésű elektronok a többségi hordozók. A p-típusú félvezetőket, azért hívjuk p-típusúnak, mert a pozitív töltésű lyukak a többségi hordozók. Minél több van a többségi hordozókból annál kevesebb van a kisebbségi hordozókból. A többségi és kisebbségi hordozók szorzata állandó [13].

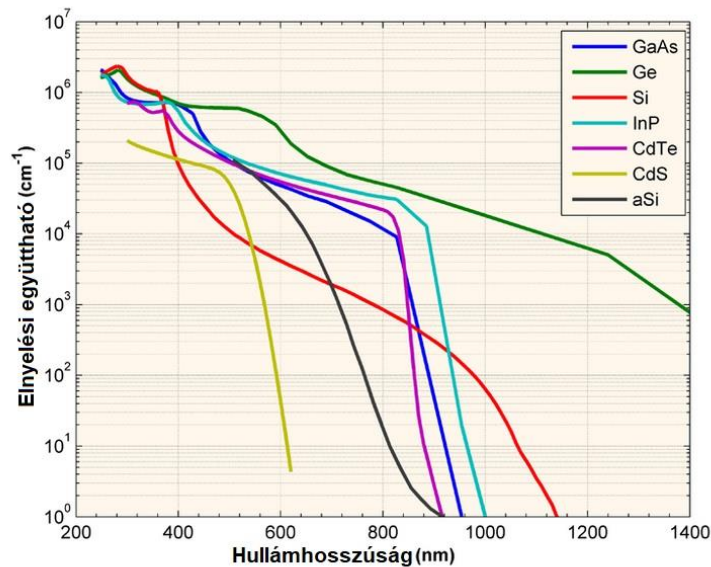
1.2 Fényelnyelés

A fény kettős természetű, azaz hullám és részecske természete is van. A fény elemi részecskéjét fotonnak nevezzük. Amikor egy félvezető felületét fotonok érik, azok vagy visszaverődnek, vagy elnyelődnek, vagy ha az előző két eset közül egyik sem következik be, akkor áthaladnak az anyagon mintha az átlátszó volna. A fotovoltalikus berendezések esetében, ha a foton visszaverődik vagy áthalad az anyagon az veszteséggel jár, hiszen azok a fotonok, amelyek nem nyelődnek el nem növelik meg a félvezető anyag belső energiáját. Azt, hogy a foton elnyelődik-e vagy sem a foton energiája határozza meg. Amennyiben a foton elnyelődik lehetősége van arra, hogy egy elektront a vegyértéksávból a vezetési sávba gerjesszen. Tehát a foton csak akkor képes egy elektront a vezetési sávba gerjeszteni, ha elég energiája van hozzá. A fotonokat, melyek a félvezetők felületét érik három kategóriába sorolhatjuk

energiájuk szerint. A fotonok melyeknek energiájuk kisebb, mint a félvezető sávközének energiája, azok áthaladnak az anyagon. Amennyiben a foton energiája megegyezik a félvezető sávközének energiájával, akkor létrejön egy elektron-lyuk pár, tehát a foton hatékonyan elnyelődött. Ha a foton energiája nagyobb, mint a félvezető sávközének energiája akkor is létrejön egy elektron-lyuk pár, viszont a többletenergia elvész, disszipálódik. A foton elnyelése létrehoz többségi és kisebbségi töltéshordozókat. A fotovoltalikus berendezésekben nagyságrendekkel kevesebb fény által generált hordozó van, mint amennyi a szennyezésnek köszönhetően van jelen, tehát egy megvilágított félvezetőben a többségi hordozók száma nem változik jelentős mértékben. A kisebbségi hordozókról épp az ellenkező mondható el, hiszen a fény által létrehozott kisebbségi hordozók száma meghaladja a szennyezésnek köszönhetően jelen lévő kisebbségi hordozók számát, így a félvezetőben jelen lévő kisebbségi hordozók száma megközelítőleg egyenlő a fény által létrehozott kisebbségi hordozók számával [14].

1.3 Abszorpciós együttható, abszorpciós mélység

Az abszorpciós együttható meghatározza, hogy milyen mélyen tud egy adott hullámhosszúságú fény behatolni az anyagba mielőtt elnyelődne. Az abszorpciós együttható függ az anyagtól és az azt érő fény hullámhosszúságától. Az olyan anyagokban, melyeknek kicsiny az abszorpciós együtthatójuk rosszul nyelődik el a fény, és ha túl vékony az anyag akkor egyáltalán nem nyelődik el az adott hullámhosszúságú fény.



2. ábra Különböző félvezetők abszorpciós együtthatója a hullámhosszúság függvényében [15]

A félvezetők abszorpciós együtthatójukban nagy töréseket figyelhetünk meg, mert a fény, ami a felületüket éri nem rendelkezik elég energiával ahhoz, hogy egy elektront a vezetési sávból a vegyértéksávba gerjesszen. Az olyan fotonok, melyek energiája csak közelíti a félvezető sávközének energiáját kisebb valószínűséggel hasznosulnak, hiszen csakis azon elektronokat tudják gerjeszteni, melyek már amúgy is a vegyértéksáv szélén vannak. Minél nagyobb a foton energiája, annál több elektron tud vele interakcióba lépni, növelve ezzel a foton hasznos elnyelődésének esélyét [16].

Az abszorpciós mélység tulajdonképpen az abszorpciós együttható reciproka. Megadja azt a mélységet az anyagban, ahol az anyagot érő fotonok intenzitása eredeti intenzitásuk $\frac{1}{e}$ -ed részére, vagyis 36%-ára csökkent. A magas energiájú, rövid hullámhosszúságú fényeknek, mint például a kékfénynek magas az abszorpciós együtthatójuk, ezáltal a felszínhez közel nyelődnek el. Ezzel szemben a kisebb energiájú, hosszabb hullámhosszúságú fények, mint például a vörös fény mélyebbre hatolnak az anyagban mielőtt elnyelődnének. Az abszorpciós mélységet figyelembe kell venni fotovillamos modulok tervezésekor, hiszen ez alapján kell megválasztani az adott félvezető anyag vastagságát [17].

1.4 Termelési arány, rekombináció

A termelési arány fontos paraméter napelemek tervezésénél, hiszen megadja a fotovoltalikus eszköz egyes pontjain létrejövő elektron-lyuk párok számát a fotonok elnyelésének köszönhetően bármilyen hullámhosszúságú fény esetén. Az anyagban elnyelődő fény mennyiségét – a fényvisszaverődést figyelmen kívül hagyva – az anyag abszorpciós együtthatója és az anyag vastagsága határozza meg. A termelés az anyag felületén a legnagyobb, mert az azt érő fény intenzitása ott a legnagyobb, nagy része ott nyelődik el [18].

A rekombináció az anyagban létrejövő veszteségként definiálható. Egy elektron újraegyesül egy lyukkal és leadja az energiáját fény vagy hő formájában. Mivel az elektron elvesztette az energiáját, így visszakerül a vegyértéksávba és ilyenkor eltávolít egy lyukat onnan. Ezt a folyamatot nevezzük rekombinációnak [19]. A rekombináció befolyásolja a napelem élettartamát. Három típusát különböztetjük meg. Beszélhetünk sugárzási, auger és hiba által elősegített rekombinációról. A szilícium alapú napelemekben az utóbbi kettő rekombináció jelentkezik a legtöbb esetben, ezért csak ezeket ismertetem részletesebben.

Az auger rekombináció egy olyan folyamat, melyben három hordozó vesz részt. Akkor következik be, amikor egy elektron és egy lyuk rekombinálódik, de ahelyett, hogy az elektron fény vagy hő formájában adná le az energiáját, egy másik, a vezetési sávban lévő elektronnak adja át az energiáját és az elektron ezután visszakerül a vezetési sáv szélére. Az auger rekombinációnak olyan félvezetőkben van a legnagyobb jelentősége, melyekben magas a hordozókoncentráció a szennyezésnek köszönhetően. A szilícium alapú napelemekben az auger rekombináció korlátozza a napelem élettartalmát és hatékonyságát. Minél szennyezettebb az adott anyag, annál rövidebb a rekombinációs élettartama. Olyan félvezetőkben megy végbe a folyamat, melyeknek kicsi a sávközük, az auger rekombináció hatása pedig csökken a sávköz növekedésével.

Hiba által elősegített rekombináció során egy elektron (vagy egy lyuk) a tiltott sávban ragad a kristályrácsban előforduló hibáknak köszönhetően. Ezek a hibák véletlenül is előfordulhatnak, de a szennyezésnek köszönhetően is jelen lehetnek.

Mivel az elektron nem tud mozogni a tiltott sávban könnyebben eljuthat hozzá egy lyuk. Ha a lyuk (vagy az elektron) eléri ugyan azt az energiaszintet, amiben az elektron ragadt mielőtt az újra a vezetési sávba kerülne rekombinálnának [20].

1.5 Töltéshordozók mozgása a félvezetőkben

A vezetési sávban lévő elektronokat és a vegyértéksávban lévő lyukakat szabad töltéshordozónak tekinthetjük, mivel szabadon mozoghatnak a félvezető rácsában, ami az anyag kristályszerkezetét alkotja. Ezeket a mozgásokat a legtöbb esetben úgy jellemezhetjük, hogy minden egyes töltéshordozó véletlenszerű irányban mozog egy adott sebességgel. A töltéshordozók addig mozognak egy véletlenszerű irányba, amíg nem ütköznek egy atommal a kristályrácsban. Miután az elektron nekiütközött egy atomnak tovább mozog egy újabb, véletlenszerű irányba [21]. A töltéshordozók mozgási sebessége a rács hőmérsékletétől függ. A töltéshordozók folyamatos véletlenszerű mozgása egy rendezett eloszláshoz vezet. Ezt a folyamatot nevezzük diffúziónak. Tehát a töltéshordozók olyan helyekről, ahol magas a koncentrációjuk, olyan helyekre mozognak ahol alacsony a koncentrációjuk. Ha hagyjuk, hogy ez a véletlenszerű mozgás végbemenjen idővel a töltéshordozók egyenletesen eloszlanak majd a térben a véletlen mozgásnak köszönhetően. Mivel a szabad töltéshordozók gyorsabban mozognak magasabb hőmérsékleten a diffúzió is gyorsabban következik be magasabb hőmérsékleten. Ha a félvezetőben lévő töltéshordozókra elektromos tér hat, akkor a töltéshordozók rendezetten fognak mozogni. Az elektronok az elektromos tértől elfelé a lyukak pedig az elektromos tér felé kezdenek el mozogni [22].

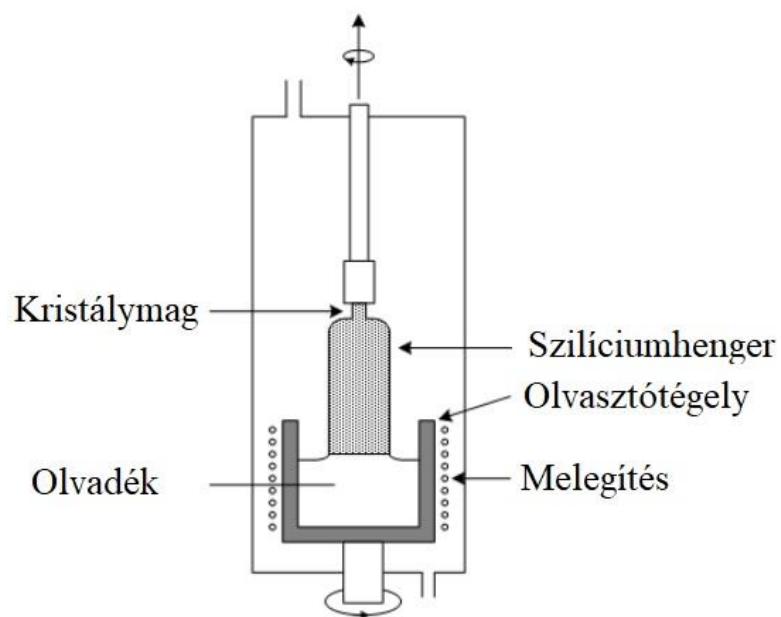
1.6 P-N átmenet létrehozása

A p-n átmenet elkülöníti az elektronokat és a lyukakat a napelemben, két eltérő töltésű oldalt létrehozva, ezáltal feszültség keletkezik. Az átmenetet úgy hozzák létre, hogy egyesítenek egy n- és egy p-típusú félvezetőt. Mivel az n-típusú vezetőkben magas az elektronkoncentráció és a p-típusú félvezetőben magas a

lyukkonzentráció, az elektronok szétterjednek a p-típusú oldalban és a lyukak is az n-típusú oldalban. Ha az elektronok és a lyukak nem rendelkeznének töltéssel, akkor ez a diffúziós folyamat addig folytatódna, amíg az elektronok és a lyukak száma megegyezne a két oldalban. Azonban a PN átmenetben amikor az elektronok és a lyukak elmozdulnak töltéseket hagynak maguk után, melyek rögzítettek a kristályrácsban és nem tudnak elmozdulni. Az n-típusú oldalon pozitív, a p-típusú oldalon negatív ionok keletkeznek. Ezen ionok között egy elektromos tér jön létre. Ezt a teret nevezzük kiürített tartománynak, mivel az elektromos tér jelenléte miatt eltűnnek a szabad hordozók erről a területről [23].

1.7 Szilícium előállítása

A szilícium-dioxid a legnagyobb mennyiségben előforduló anyag a földkéregben, kvarc formájában található. Habár a tengerparti homoknak is a nagy része kvarc, az elektromos berendezésekhez használt szilíciumot nagy tisztaságú kvarckövekből állítják elő [24]. Ahhoz, hogy a szilícium-dioxidból 99,9% tisztaságú szilícium lehessen több folyamaton is át kell esnie. Az első lépés az oxigén eltávolítása, amit nagyon magas hőmérsékleten (2000°C -on) olvasztókemencében, szén hozzáadásával érnek el. A szénnek az a szerepe ebben a folyamatban, hogy megköti az oxigént ezért melléktermékként szén-dioxid jön létre. Tehát a szilícium dioxidból (SiO_2) és a hozzáadott szénből (C) szilícium (Si) és széndioxid (CO_2) jön létre. Az így kapott szilícium 98% tisztaságú, ami napelemes felhasználáshoz még nem elég. A folyamat után hagyják kihűlni a szilíciumot, ezután pedig finom porrá darálják. Az így kapott port újra egy kemencébe töltik, majd hozzáadják a szennyezőatomokat (általában Bórt) és újra megolvasztják. Ezután az olvadékba egy már megszilárdult szilíciumkristályt lógatnak be, aminek köszönhetően megindul a kristálynövekedés. A belógatott szilíciumkristályra kikristályosodik az olvadékból az anyag. A kristálynövekedés megindulásával folyamatos sebességgel forgatják és húzzák ki a tartályból a magkristályt. A hőmérséklet és a húzási- és forgási sebesség szabályozásával az olvadékból egy nagyméretű egykristályos henger alakú szilíciumtömb lesz. Ezt a módszert nevezzük Czochralski-módszernek [25].



3. ábra Czochralski-módszer [26]

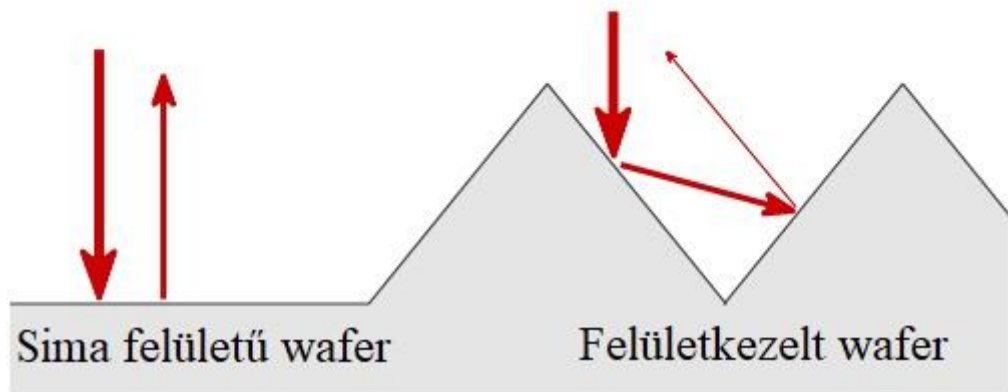
Az így kapott 99,9% tisztaságú szilíciumhengerek monokristályosak. Az elkészült hengereket gyémántszemcsés, huzalos szeletelőgépekkel szögletessé alakítják, majd vékony szeletekre vágják, ezeket hívják wafer-nek.



4. ábra Czochralski-módszerrel előállított szilíciumhenger [27]

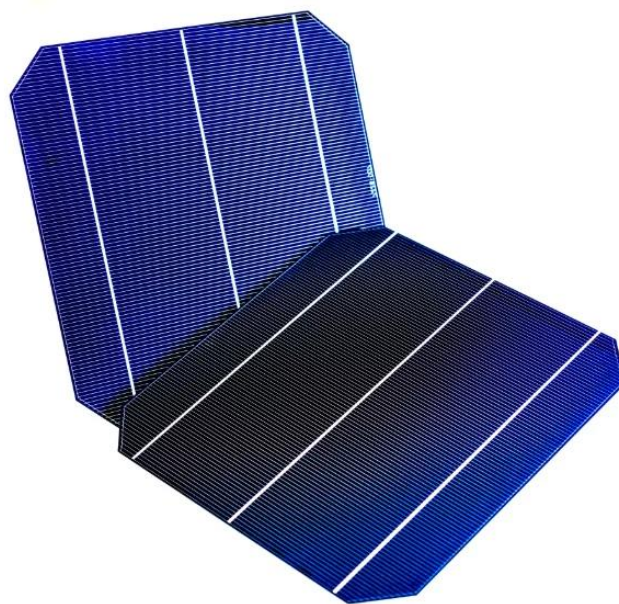
1.8 Waferek felületkezelése

A felszeletelt szilíciumlapkák felületei teljesen simák. Ez kedvezőtlen fotovoltalikus felhasználás szempontjából, hiszen a sima felületekről könnyebben verődik vissza a fény. A szilíciumlapkák felületét különböző marási technológiákkal kezelik, aminek köszönhetően a lapka felülete olyan lesz, mintha kis piramisokból állna. Így a lapkákat érő fénynek nagyobb esélye van arra, hogy az első visszaverődés után újra a wafer felületébe ütközzön.



5. ábra A fény útja a wafereken [28]

A szilíciumlapkákat forró nátrium-hidroxid oldatban tisztítják, ami eltávolítja a felületi szennyeződések és a felső $10\mu\text{m}$ -nyi sérült szilikonréteget. Ezután a lapkák felületére foszfor tartalmú vegyületet visznek fel, majd egy kemencébe helyezik a wafereket, hogy egy kevés foszfor a szilícium felületébe ivódjon. Következő lépésként eltávolítják a szilíciumlapka széleiről a foszfort, ezáltal az előlő emitter elektromosan el van választva a cella hátsó részéről. A szilíciumlapkákra ezt követően egy tükröződégátló anyagot visznek fel a jobb fényelnyelés érdekében. A lapka felső részére áramelvezető kontaktusrácsot nyomtatnak, amihez ezüstöt használnak. A lapka hátsó oldalára is kerül áramelvezető kontaktus, amit két részben nyomtatnak rá. Elsőként egy vastag alumínium réteg kerül fel, majd miután ez megszáradt felkerül a második réteg is amihez ezüstöt használnak. A lapkákat magas hőmérsékleten kezelik ezek után [29].



6. ábra Kész szilícium wafer [30]

2 NAPELEMEK MŰKÖDÉSE, FELÉPÍTÉSE ÉS TÍPUSAI

A napelem egy olyan elektromos berendezés, ami a napfényt közvetlenül elektromos energiává alakítja át. Ehhez a folyamathoz egy olyan anyag szükséges, melyben a fény elnyelése magasabb energiaszintre emel egy elektront és biztosítani kell, hogy ez, a magasabb energiaállapotba került elektron eljuthasson egy külső áramkörbe, ahol leadhatja az energiáját, majd visszatérhet a napelembe. Sok anyag eleget tesz ennek a feltételnek, de fotovoltaiikus alkalmazásban majdnem minden esetben p-n átmenetes félvezetőket alkalmaznak.

Ahhoz, hogy egy napelemben feszültség keletkezzen két folyamatnak kell végbemennie. Az első ilyen folyamat a fény elnyelése, ami által létrejön egy elektron-lyuk pár. Ahhoz, hogy létrejöjjön egy elektron-lyuk pár a napelem felületét érő fotonnak nagyobbak kell lennie az energiájának, mint az anyag sávközének. Azonban az elektronok a p-típusú oldalon és a lyukak az n-típusú oldalon csak ideiglenesen vannak stabil állapotban és a kisebbségi hordozók élettartamának megegyező ideig léteznek mielőtt rekombinálnának. Ha rekombinálnak a fény által létrehozott elektron-lyuk pár elvész és nem keletkezik feszültség. A második folyamat ezen hordozók összegyűjtése a p-n átmenet által, ami az elektromos térnek köszönhetően megakadályozza a rekombinációt úgy, hogy elválasztja térben az elektront és a lyukat. Ha a fény által létrehozott kisebbségi hordozók elérik a p-n átmenetet, akkor az elektromos tér hatására átkerülnek az átmeneten, ahol már többségi hordozókká válnak. Ha a napelem rövidre van zárva, akkor a fény által létrehozott hordozók áthaladnak a külső áramkörön [31].

Tehát, amikor fény éri a napelem felső rétegét (n-típusú réteg), akkor létrejön egy elektron-lyuk pár az n-típusú rétegben. Az elektron a külső áramkörbe kerül, ahol leadja a többletenergiáját a lyuk pedig átkerül az n-típusú oldalról a p-típusú oldalra, ahol már többségi hordozó. Ezután az elektron a külső áramkörből visszatér a napelem hátsó érintkezőjén keresztül a p-típusú oldalra, ahol újra egyesül a lyukkal, így megmarad az elektron-lyuk pár és feszültség is keletkezett.

2.1 Napelemek felépítése

A kész szilíciumlapkákat sorosan összekötik, a lakossági felhasználásra szánt napelemekben általában hatvan darab szilíciumlapka van. Közműveknél, napelemfarmokon olyan napelemeket telepítenek, melyekben hetvenkét darab szilíciumlapka van [32]. A napelemekben lévő cellákat egy gyűjtősín segítségével kötik össze. Miután összekötötték a cellákat a felső oldalukkal lefelé egy üveglapra helyezik őket, majd erre az üveglapra és a cellák hátoldalára is egy tokozóanyag kerül, aminek anyaga EVA, azaz Etilén-Vinil-Acetát, ami egy polimer anyag. A tokozóanyagnak alacsony hőellenállásúnak kell lennie és bírnia kell a magas UV sugárzást is. A felső rétegnek nagy fényáteresztő képességgel kell bírnia, szilícium alapú napelemek esetén 350-1200 μm közötti hullámhossztartományban. Ezután a modult egy kemencébe helyezik, egyesítve ezzel az alsó és felső rétegeket. A tokozásnak strapabírónak és vízállónak kell lennie, hiszen a cellák rendkívül vékonyak, így kifejezetten sérülékenyek, továbbá összeköttetések víz vagy magas páratartalom hatására rozsdásodhatnak, ami kedvezőtlen a napelem élettartalmára és hatásfokára nézve.

A napelemek legfontosabb paramétere a hatásfokuk. A hatásfok megmutatja, hogy a beeső fény teljesítményének hányad részét alakítja át villamos energiává. A hatásfokot η -val jelöljük. Úgy számoljuk, hogy a generált villamos teljesítményt elosztjuk a beeső fény teljesítményével. Itt érdemes megjegyeznünk, hogy mivel a hatásfokot gyakran százalékban fejezik ki, ezért gyakran meg kell szorozni százszal az osztás eredményét. A hatásfokról elmondható, hogy a hőmérséklet növekedésével csökken, de a csökkenés mértékét a napelem anyaga határozza meg [33].

Tehát a tokozásnak két fontos szerepe van. Megvédi a cellákat a külső környezeti hatásoktól és védelmet nyújt a mechanikai sérülések ellen is. Ezután egy alumínium keret kerül a modul köré, melynek könnyűnek és merevnek kell lennie, hogy ellenálljon a külső környezeti hatásoknak, továbbá védi a tok szélét is [34]. Gyártási technológiától függően többféle típusú napelemet különböztethetünk meg.

2.2 Napelemek típusai

Többféle típusú napelem létezik. A két legelterjedtebb változat a mono- és a polikristályos napelemek, melyeket szokás elsőgenerációs napelemeknek is nevezni. A monokristályos napelemek, ahogy azt a nevük is sugallja olyan cellákból állnak, melyeket egyetlen egy szilícium kristályból növesztettek, ahogy írtam róla korábban is.

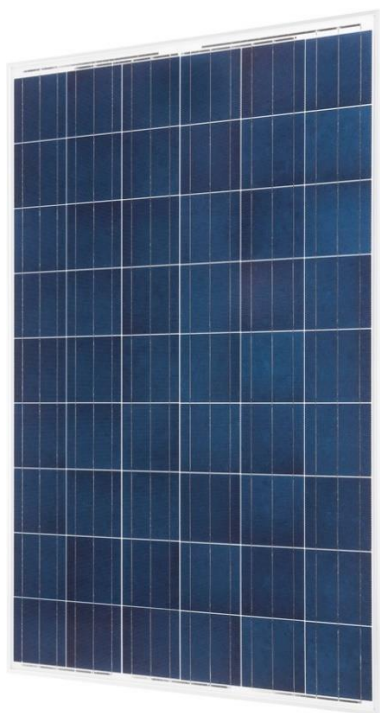
A legújabb monokristályos napelemek hatásfoka meghaladja a 20%-ot is, élettartalmuk a leghosszabb a napelemek közül és a magasabb hőmérsékletek sem befolyásolják annyira a termelésüket, mint a polikristályos napelemek esetén. Celláik fekete színűek, melyek széleit levágták a helytakarékoság érdekében. A szórt napfényt viszont nem hasznosítják olyan jól, mint a közvetlen napsütést és a monokristályos szilícium előállításának bonyolultsága miatt drágábbak is [35].



7. ábra Monokristályos napelem [36]

A polikristályos napelemeket nem egy, hanem több kristály alkotja. Celláik előállításához szilíciumot olvasztanak, ami gyorsabb és olcsóbb eljárás, mint a Czochralski-módszer, viszont ennek köszönhetően hatásfokuk csak 13-17% között

van és élettartalmuk is rövidebb, mivel magasabb hőmérsékleten kezelték a szilíciumot. Kékes-lila színük van és négyzet alakú cellákból állnak, melyek éleit nem vágják le. A polikristályos napelemek kevésbé érzékenyek a tájolásra és dőlésszögre [35].



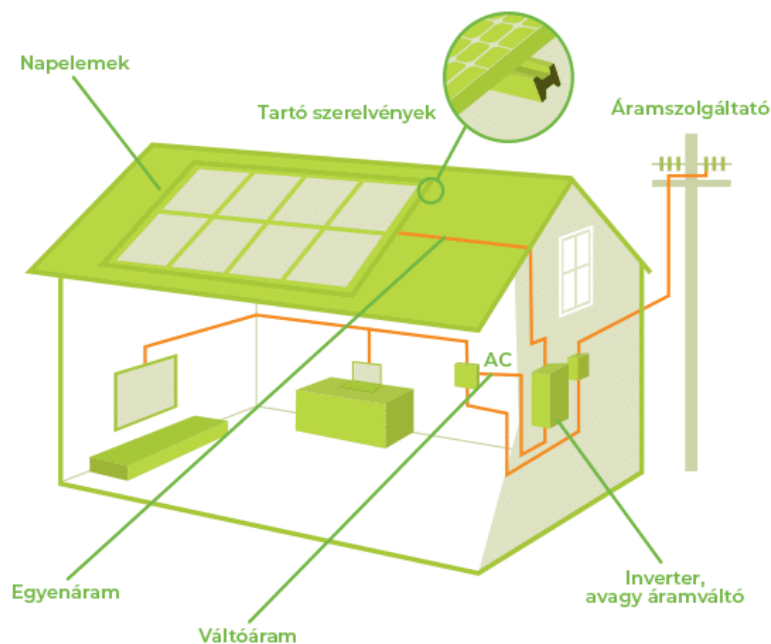
8. ábra Polikristályos napelem [37]

Másodikgenerációs napelem, a vékonyfilmes vagy amorf napelem, minek előállításához nem kristályos szilíciumtömbökből vágnak cellákat, mint a mono- és polikristályos napelemek esetén, hanem fotovoltalikus anyagot visznek fel üvegre vagy más hordozóra. Az egyik legelterjedtebb vékonyfilmes napelemanyag az amorf- és a mikromorf szilícium. A félvezető réteg ebben az esetben is szilícium, viszont nem kristályos tömbökből, hanem szilán gázból állítják elő. Kémiai folyamatokkal leválasztják a hidrogént a szilíciumról, ami ennek köszönhetően lerakódik a hordozóra. Az amorf napelemek előállítása jelentősen olcsóbb és egyszerűbb, mint az elsőgenerációs napelemek gyártása. Nagy előnyük még a kristályos napelemekkel szemben, hogy hajlékonyak és kevésbé befolyásolja a termelésüket a magas hőmérséklet. Hátrányuk, hogy rendkívül helyigényesek, így

lakossági felhasználásra alkalmatlanok és élettartalmuk is rövidebb, mint az elsőgenerációs napelemeknek [38].

2.3 Lakossági felhasználású napelemes rendszer részei

Ahhoz, hogy termelni tudjunk a napelemekkel szükségünk van több berendezésre is. A napelemes rendszerek legfontosabb eleme az inverter, hiszen a napelemek egyenáramot termelnek, amit szükséges váltakozó árammá alakítanunk. Ezt a feladatot végzi el az inverter. Az inverter fontos paramétere a teljesítménye, azaz hogy hány napelemet tudunk rákötni és a fázisszáma, vagyis hogy hány fázisú rendszerbe táplál. Mivel a lakossági felhasználású napelemrendszerek nem csak a háztartás energiaigényeit fedezik, hanem a hálózatba is visszatáplálnak szükséges egy olyan mérőóra telepítése, amely képes a hálózatba visszatáplált energia mérésére is. Ezeket a mérőórákat ad-vesz mérőóráknak nevezzük. A rendszer szintén egy nagyon fontos eleme a napelem tartószerkezete. A tartószerkezetnek ellenállónak kell lennie a környezeti hatásokkal szemben, olyan anyagból kell készülnie, ami nem rozsdásodik, hiszen akár harminc éven keresztül is tartania kell a napelemeket. A tartószerkezet anyaga általában rozsdamentes acél és alumínium. Gondoskodnunk kell a rendszer biztonsági berendezéseiről is. A napelemek rendelkeznek gyárilag beépített biztonsági berendezésekkel, de ezek elsősorban az invertert védik. Ezen felül telepítenek még AC és DC oldali túlfeszültségvédelmet is és tűzvédelmi berendezéseket is. A rendszer részét képezik még a kábelek, melyek összeköttetést biztosítanak a napelem és az inverter és az inverter és a ház elektromos rendszere között. A napelem és az inverter között lévő kábeleknek fontos, hogy alacsony ellenállásúak legyenek [39].



9. ábra Lakossági napelemes rendszer részei [40]

2.4 Napelemek tájolása

Mivel a napelemek nem termelnek energiát, ha nem éri fény a felületüket, vagy jelentősen kevesebb energiát termelnek, ha nem megfelelő szögben éri őket a napfény, ezért fontos, hogy megfelelő helyre és szögben telepítsük őket. Magyarország az északi szélesség 47° -án helyezkedik el, így hazánkban a napelemeknek a legmegfelelőbb dőlésszög 35° - 45° közé esik. Továbbá érdemes a napelemeket a délre néző tetőkre telepíteni, mert ott érheti őket a legtovább napfény. A legideálisabb eset az lenne, ha a napelemek felületét érő napfény derékszöget zárna be a napelem felületével. Mivel háztartási méretű napelemrendszerekben a napelemek rögzített pozícióban vannak ez a feltétel csak egy bizonyos időpontban adott a nap folyamán [41].

Léteznek azonban olyan napelemes rendszerek, melyek különféle megoldásokkal képesek több napfényt hasznosítani egy nap leforgása alatt. Ilyen például a napkövető napelem, melynek tartószerkezetei különféle szenzorok

segítségével képesek követni a nap mozgását, így a napelemek felületét mindig derékszögben éri a napfény. A mozgáshoz szükséges energiát is napelemekkel állítják elő. Az ilyen rendszerek jelentősen több energiát tudnak termelni, mint a hagyományos, statikus napelemek, viszont a mozgó alkatrészek jelenléte miatt élettartalmuk rövidebb, ezáltal kevesebb garanciát vállalnak a gyártók és jelentősen drágábbak is [42]. Egyre elterjedtebbek a bifaciális, azaz a kétoldalas napelemek, melyek mind a két oldalukon rendelkeznek fényelnyelésre alkalmas réteggel és üvegborítással. Ennek köszönhetően 10%-al több energiát képesek termelni és tartósabbak, jobban ellenállnak a környezeti hatásoknak, mint a monofaciális napelemek. Így a gyártók is több jótállást vállalnak a bifaciális napelemekre. Annak érdekében, hogy a napelem hátsó oldalával is a lehető legtöbb energiát tudjuk előállítani érdemes őket olyan felületek felé telepíteni, melyekről a fény jól vissza tud verődni. Amennyiben erre nincs lehetőség alternatív megoldás lehet fényvisszaverő anyagok, fehér kövek, homok elhelyezése a napelem alá. Hátrányuk azonban, hogy drágábbak és nehezebbek, mint a hagyományos napelemek [43].

3 AZ IEC61730 SZABVÁNY BEMUTATÁSA

A szabvány a fotovillamos modulok biztonságos villamos és mechanikai működéséhez szükséges alapvető kialakításának követelményeit adja meg és ismerteti. Ismereteket közöl a mechanikai és környezeti igénybevételek által okozott áramütés, tűzveszély, személyi sérülés megelőzésének értékeléséhez. A szabvány első része a kialakítások kiegészítő körülményeit, a szabvány második része a vizsgálatokra vonatkozó körülményeket ismerteti. A szabványban érintett modulok egyenfeszültsége legfeljebb 1500 V lehet.

Szakdolgozatomban csak a szabvány első részét fogom ismertetni, hiszen a vizsgálatok és azok körülményei irrelevánsok a fotovillamos modulok felépítése és működése szempontjából. A szabvány első része a fotovillamos modulok biztonságos villamos és mechanikai működéséhez szükséges alapvető kialakításának követelményeit adja meg. Ez a szabványsorozat fekteti le a szabadtéri klimatikus viszonyok között tartósan működtetett, földi alkalmazású fotovillamos modulok IEC (International Electrical Commission – Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság) szerinti követelményeit. Nem foglalkozik olyan speciális követelményekkel, melyek épületeken, vagy járműveken való alkalmazásokra vonatkoznak. Nem érint olyan termékekre vonatkozó speciális követelményeket, melyek egyesítik a fotovillamos modulokat és az energiaátalakító berendezéseket. A szabvány célja a fotovillamos modulok biztonsági követelményekkel kapcsolatos kialakításának ismertetése. Ezen követelményekkel a legkisebbre csökkentik a fotovillamos modulok nem rendeltetésszerű alkalmazásait, az alkatrészek olyan meghibásodásait, melyek tüzet, áramütést vagy személyi sérülést okozhatnak. A szabvány megköveteli, hogy minden fotovillamos modul legyen alkalmas kültéri, időjárás ellen nem védett helyen való működésre, ahol ki van téve közvetlen és közvetett napsütésnek -40°C és $+40^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékletnek, 100%-ig felmenő relatív páratartalomnak, esőnek. Úgy kell megtervezni ezen modulokat, hogy ellenálljanak a villamos, mechanikai, termikus és környezeti (hőmérséklet, nedvesség, UV sugárzás) hatásoknak, melyek a tervezett alkalmazások során felléphetnek és ne jelentsenek veszélyt sem a felhasználóra, sem a környezetre. A szabvány minden földi, síkfelületű modul esetén alkalmazandó. Ez

a nemzetközi szabvány a fotovillamos modulok változatos alkalmazásához adja meg az alapvető követelményeket, de nem tekinthető úgy, mintha átfogna minden nemzeti vagy területi érvényű előírást [44].

3.1 Osztályokba sorolás, alkalmazások, tervezett használat

Az áramütés elleni védelmet a modulok összeépítésénél alkalmazott konstrukciós intézkedések és a modulok felszerelési módjának kombinációja eredményezi. A szabvány az első érintésvédelmi osztályba tartozó modulokkal nem foglalkozik [45].

3.2 0. érintésvédelmi osztályú modulok

Ezen fotovillamos modulok egyedi és/vagy rendszerszintű villamos kivitelezéssel rendelkeznek veszélyes feszültséggel, árammal és teljesítménnyel. A 0. érintésvédelmi osztályba tartozó modulok csak alapszigeteléssel, mint alapvető védelemmel vannak ellátva, hibavédelemmel nem rendelkeznek. A szabvány szerint minden olyan vezetőképes alkatrészüket, melyek nincsenek legalább alapszigeteléssel elválasztva a veszélyes aktív részekről úgy kell kezelni, mintha veszélyes aktív részek lennének. Ezen fotovillamos modulok korlátozott hozzáférésű területen való alkalmazásra készülnek, mely a nyilvános hozzáférés ellen az általános hozzáférést megakadályozó kerítéssel vagy más elhelyezéssel védve vannak. Az ilyen modulokat csak hozzáértő személyek érhetik el, akik tudatában vannak az alkalmazásuknak és meghibásodási módjaikból eredő veszélyeknek. A megérinthető vezetőképes részeknek a 0. érintésvédelmi osztályú modulokon vagy földelve kell lenniük, vagy veszélyes potenciálúnak kell tekinteni őket [46].

3.3 II. érintésvédelmi osztályú modulok

Ezen fotovillamos modulok rendelkezhetnek egyedi és/vagy rendszerszintű villamos kivezetéssel, melynek veszélyes szintű a feszültsége, árama és

teljesítménye. A II. érintésvédelmi osztályba tartozó moduloknak rendelkezniük kell alapszigeteléssel, mint alapvető védelemmel és kiegészítő szigeteléssel, mint együttes alap és kiegészítő szigeteléssel. A szabvány előírja, hogy a megérinthető vezetőképes részek és a szigetelőanyagokból készült megérinthető felületeknek legyenek kettős vagy megerősített szigeteléssel elválasztva a veszélyes aktív részekről, vagy legyenek olyan kiépítésűre tervezve, melyek ezzel egyenértékű védelmet biztosít. Minden vezetőképes rész, amelyet csak alapszigetelés vagy ezzel egyenértékű védelmet biztosító tervezési intézkedés választ el a veszélyes aktív részekről legyen további kiegészítő szigeteléssel elválasztva a megérinthető felületektől. Minden olyan vezetőképes részt, amely legalább alapszigeteléssel nincs elválasztva a veszélyes aktív részekről, veszélyes aktív résznek kell tekinteni. Ezen fotovillamos modulokat olyan létesítésre tervezik, ahol számítani kell általános nyilvános hozzáférésre és a szigetelt aktív részek megérintésére [47].

3.4 III. érintésvédelmi osztályú modulok

A szabvány szerint ezeknek a fotovillamos moduloknak nem lehet nagyobb a névleges teljesítményük, mint 240 watt, az üresjárási feszültségük nem haladhatja meg a 35 V egyenfeszültséget és szabványos vizsgálati körülmények között zárlati áramuk nem lehet nagyobb, mint 8A. A III. érintésvédelmi osztályú modulok alapvető, korlátozott villamos kimeneti értékeik következtében alkalmazásuk, nem rendeltetésszerű használatuk, meghibásodásuk során nem valószínű, hogy áramütés vagy tűzveszélyt okoznának. A korlátozott kimeneti villamos paraméterekkel szemben ennek következtében nincs konstrukcióra, üzemi szigetelésre vonatkozó további követelmény. Olyan létesítésre tervezik őket, ahol számítani kell általános nyilvános hozzáféréshez, a szigeteletlen aktív részek megérintésére. Nem szabad őket olyan sorba kapcsolni, melynek V_{oc} üresjárási feszültsége nagyobb 35 voltnál és a rendszer névleges feszültsége legfeljebb 35 volt lehet. Nem tervezik más fotovillamos modulokkal, energiaforrásokkal való párhuzamos üzemre, kivéve, ha a kapcsolási védelmet nyújtó visszáram ellen és túlfeszültségvédelemmel is el van látva [48].

3.5 Áramütés elleni védelem

A szabvány előírja, hogy úgy kell a fotovillamos modulokat tervezni, hogy megfelelő védelmet biztosítsanak a veszélyes aktív részek megérintése ellen, melyeknek nagyobb a feszültségük, mint 35 V DC. A 0. osztályba tartozó moduloknak a megérinthető részeit legalább alapszigeteléssel el kell választani a veszélyes aktív részekről. A II. osztályba tartozó modulokat úgy kell tervezni, hogy csak azokat a részeket lehessen megérinteni, melyek kettős vagy megerősített szigeteléssel el vannak választva a veszélyes aktív részekről. A III. osztályba tartozó fotovillamos modulok esetén az aktív részek nem tekinthetők veszélyesnek, a megérinthető részek elválasztása nem szükséges. A különböző polaritású aktív részeket legalább üzemi szigeteléssel el kell választani egymástól. A megfelelőségi vizsgálatot mind a három érintésvédelmi osztály esetén szemrevételezéssel, illetve megérinthetőségi vizsgálattal kell elvégezni [49].

3.6 Fotovillamos modulok szerkezeti részeivel szemben támasztott követelmények

A szabvány áramütés elleni védelem esetén a fotovillamos modulok burkolataival szemben is támaszt követelményeket. Meghatározza, hogy úgy kell a modulok burkolatait tervezni, hogy felszerelés után az aktív részek érintése ne legyen lehetséges. Ennek a feltételnek akkor is teljesülnie kell, ha a ház vagy a fedél az üzemszerű használat során deformálódik. A burkolatok szerszámok nélkül ne legyenek eltávolíthatók. A fedél eltávolítása után a szerszám ne kerülhessen kapcsolatba az aktív részekkel. A napelemek tokai a laminálás részének tekinthetőek. Műszaki tulajdonságaiknak megfelelőnek kell lenni az adott alkalmazásnak. A névleges üzemi hőmérséklettartománynak magában kell foglalnia a tervezett alkalmazás hőmérséklettartományát. A burkolatok anyagcsoportjai, szigetelési ellenállásaik és villamos szilárdságuk meg kell hogy feleljen a tervezett alkalmazásnak. A tokok megfelelőségi vizsgálatát a szabvány második része szerint kell elvégezni. A fotovillamos modulok elő- és hátlapjainak olyan réteges anyagból kell, hogy álljanak, mint a filmek, ragasztók és fedőrétegek, melyek közül legalább

az egyik anyag rétegének szolgáltatnia kell a támasztó villamos szigetelést más rétegeknek pedig a környezeti tényezők ellen kell támasztó szigetelést nyújtaniuk. Az elő- és hátlapok rétegei, melyek támasztó szigetelésként funkcionálnak, ellen kell, hogy álljanak minden jelentős mechanikai, villamos, termikus és környezeti igénybevételnek, amelyekre a megfelelőséget anyag- vagy alkotó- elemszinten bizonyítani kell. Az olyan rétegeket, amelyek a kúszóáramút részét képezhetik a megfelelő anyagcsoportba kell besorolni. A polimer elő- és hátlapok megfelelőségét az IEC61730-2 szerinti vizsgálatokkal kell bizonyítani. A polimer anyagoknak a fotovillamos modulokban tartósan és biztonságosan ellen kell állniuk az alkalmazásban fellépő villamos és mechanikai, termikus, környezeti és korrozív igénybevételeknek és nem mutathatnak romlást a villamos és/vagy mechanikai tulajdonságaikban. Meg kell hogy feleljenek az anyagok kúszásvizsgálati követelményeinek. Tartósnak kell lenniük az alkalmazásban előforduló időjárási igénybevételekkel szemben. Az olyan polimer anyagoknak melyek szigetelésként vannak alkalmazva a napelemekben többféle szigetelési funkciót is betölthetnek. Az olyan anyag, mely több funkciót is betölt meg kell hogy feleljen minden alkalmazható követelménynek. A szigetelést nem károsíthatják rövid és/vagy hosszú idejű termikus igénybevételek, melyek normál üzem közben felléphetnek. Villamos igénybevételek és időjárás sem károsíthatja őket. Ellen kell állniuk azoknak a villamos igénybevételeknek, melyek az adott alkalmazásban előfordulhatnak. A megfelelőségi vizsgálatot szigetelésként alkalmazott polimer anyagok esetében szemrevételezéssel és az anyagok ellenőrzésével kell ellenőrizni. A napelemekben használt szigetelő elválasztásoknak ellen kell állniuk minden vonatkozó mechanikai, villamos, termikus és környezeti igénybevételnek. Minden esetben a helyükön kell hogy maradjanak és nem károsodhatnak olyan mértékben, hogy az elvárt villamos és mechanikai tulajdonságaik és az adott alkalmazás minimálisan elvárt értékei alá csökkenjenek. Eltávolításuk csak szerszámmal legyen lehetséges. A szabvány kimondja, hogy az olyan csavarok és mechanikai összeköttetések, amelyeknek meghibásodása a fotovillamos modul biztonságának megszűnését okozhatja, el kell hogy viseljék az üzemszerű használat során fellépő mechanikai igénybevételeket. Nem készülhetnek lágy, megfolyásra képes anyagból [50].

3.7 Villamos csatlakozásokkal, összeköttetésekkel szemben támasztott követelmények

A szabvány előírja, hogy a fotovillamos modulokban használt villamos csatlakozásokat úgy kell megtervezni, hogy az érintkezők nyomásai ne adódjanak át a szigetelőanyagokon keresztül, csak ha az kerámia vagy más olyan anyag, mely megfelelő jellemzőkkel rendelkezik, kivéve, ha van a fémrészekben megfelelő csillapítás, ami kompenzálja a szigetelőanyag zsugorodását vagy deformációját. Meg kell előzni, hogy a csatlakozások meglazulhassanak. A megfelelést szemrevételezéssel, az egyenpotenciálra hozó összekötés folytonossági vizsgálatával és a csavarkötés vizsgálatával kell ellenőrizni. A sodrott vezetővégek nem rögzíthetők lágy forrasztással olyan helyeken, ahol a vezető nyomásnak van kitéve, kivéve, ha a szorítás módját úgy tervezték, hogy az csökkentse a rossz érintkezés lehetőségét, vagy ha a forrasztott rész a csatlakozási érintkezési területen kívülre kerülnek. Intézkedéseket kell tenni annak érdekében, hogy működése közben a szorítóegységek vagy más lezárások védve legyenek az olyan termikus és mechanikus igénybevételekkel szemben, melyek rontják a villamos vezetőkéességüket. A modulokban használt csatlakozókkal szemben támasztott követelményeket a szabvány nem ismerteti, hanem egy másik, az IEC 62852 szabványra hivatkozik.

A modulon belüli összeköttetéseknek és csatlakoztatásoknak mechanikailag biztosítva kell lenniük, biztosítaniuk kell a villamos folytonosságot. A szabvány előírja, hogy vagy hegesztéssel, vagy forrasztással, vagy vezetőképes ragasztással, vagy összepréseléssel össze kell hogy legyenek kapcsolva biztos módon. Az összeköttetéseket mechanikailag is biztosítani kell, a tokozást mechanikai biztosításnak tekinthetjük. A napelemekben alkalmazott mechanikai és elektromechanikai összeköttetéseknek képesnek kell lenniük az alkalmazás során fellépő termikus, mechanikai és környezeti igénybevételeket tartósan elviselniük anélkül, hogy az összeköttetés egysége biztonságos szint alá esne. A megfelelést szemrevételezéssel, mechanikai tehervizsgálattal, modultörésvizsgálattal, az anyagok kúszásvizsgálatával és ha alkalmazható, az egyenpotenciálra hozó összekötés folytonossági vizsgálatával kell ellenőrizni. A leszerelhetőre tervezett

részek csak szerszámok segítségével legyenek eltávolíthatók. A csavarok nélkül felszerelt fedelek esetén legyen egy vagy több észrevehető rész például bemélyedések, melyek lehetővé teszik az eltávolításukhoz szükséges szerszámok használatát. A fedél helyes eltávolítása során a szerszám ne kerülhessen kapcsolatba az aktív részekkel. A mechanikai összeköttetéseknél a felületek közötti súrlódás, például egyszerű rugós nyomás nem fogadható el egyetlen olyan módszerként, ami az alkatrész elfordulását vagy lazulását gátolja [51].

3.8 Bypassdiódákkal, vezetékekkel szemben elvárt követelmények

A fotovillamos modulokban alkalmazott bypassdiódákat úgy kell méretezni, hogy a tervezett alkalmazás áramait és feszültségeit kiállják. A megfelelőséget termikus vizsgálattal, legmelegebbpont-állandósági vizsgálattal, bypassdióda funkcióvizsgálattal és szemrevételezéssel kell ellenőrizni.

A modulok belső vezetékeztését úgy kell megtervezni, hogy legyen az adott alkalmazásnak megfelelő áramvezető képességük. Az alkalmazásuk helyének szennyezettségi szintjétől függően óvintézkedéseket kell tenni a korrózió megelőzésének érdekében. A megfelelőséget szemrevételezéssel és visszaramú túlterhelésvizsgálattal kell ellenőrizni. A külső vezetékekkel szemben nem támaszt követelményeket a szabvány, hanem egy másik szabványra, az EN 50618-ra hivatkozik, az ebben leírtaknak kell a külső vezetékeknek és kábeleknél megfelelniük [52].

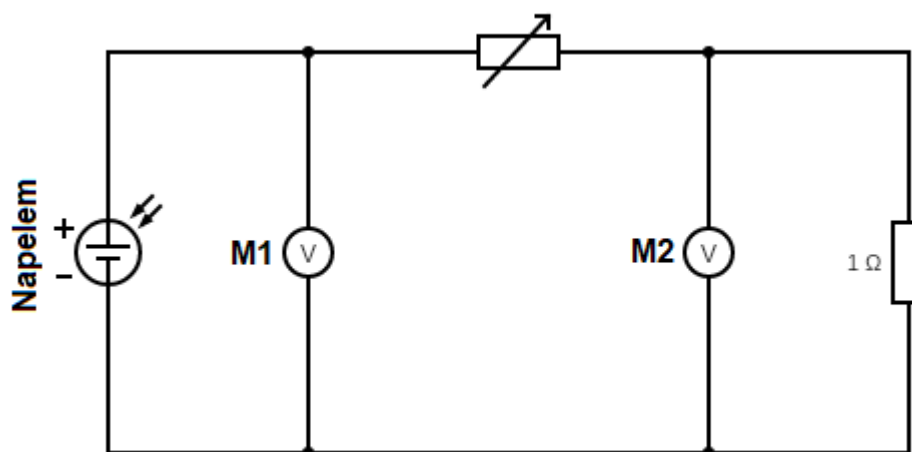
3.9 Fotovillamos modulok szállítása, összeállítása

A fotovillamos modulok gyárból való szállításkor lehetnek részenként is vagy összeszerelt állapotban is. A szabvány megköveteli, hogy összeállításuk ne igényelje a modul átalakítását az eredetihez képest. Felépítésüknek olyannak kell lennie, hogy az egyenpotenciálra hozó összekötés folytonossága nem szakadhat meg létesítés közben. Legyen minden állítható vagy mozgó szerkezeti elem reteszelő eszközzel ellátva, ami megszünteti a nem szándékos elmozdulás valószínűségét. A modulok

széle nem szabad, hogy sorjás, megérintható legyen, nem lehetnek élesek a peremei, sarkai, melyek személyi sérülést okozhatnak. Az alkatrészek meglazulását, elfordulását meg kell akadályozni, ha tűzveszélyt, áramütést vagy személyi sérülést okozhatnak [53].

4 KÍSÉRLET ISMERTETÉSE

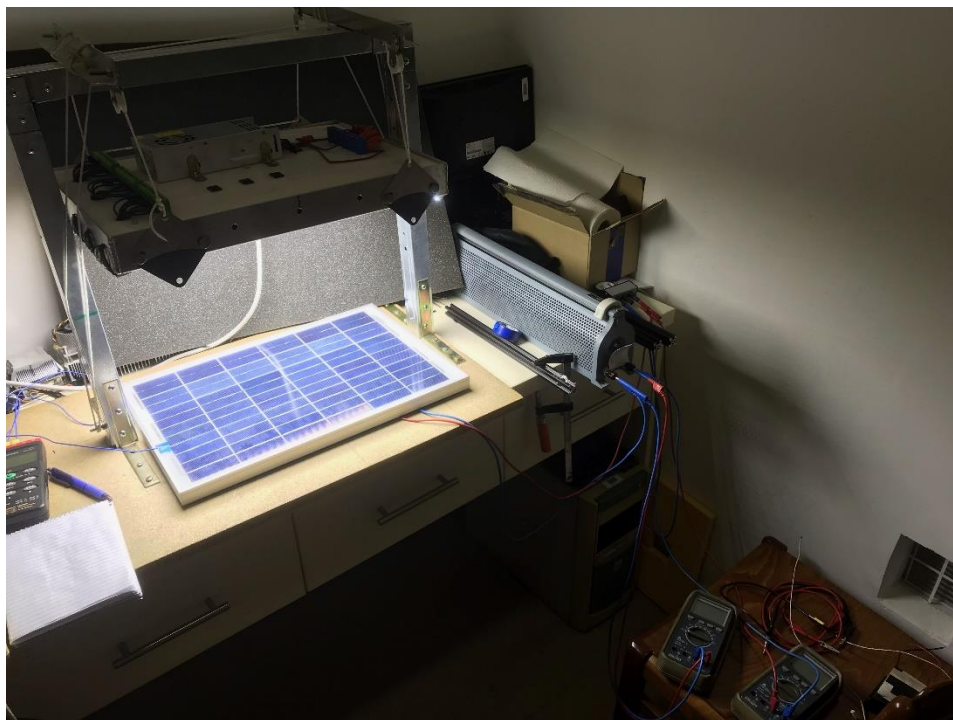
Szakdolgozatomhoz készített mérésben egy monokristályos napelem áramtermelését mértem különböző ellenállásértékek és fényintenzitásértékek mellett. A mérés elvégzéséhez két darab Escort EDM-89S típusú multimétert, egy 1Ω -os söntellenállást és egy tolóellenállást használtam. A napfényt, egy 300W/m^2 teljesítményű LED-es fényforrással helyettesítettem, melynek intenzitását egy Steca fényintenzitásmérő műszerrel mértem. A mérés során mértem a napelem hőmérsékletét is egy Voltcraft K204 típusú digitális hőmérővel.



10. ábra A mérés kapcsolási rajza [saját ábra]

Ahogy a kapcsolási rajzon is látható a napelemmel sorba kötöttem egy változtatható ellenállású ellenállást, és egy 1Ω -os söntellenállást. A napelemmel párhuzamosan bekötöttem két darab digitális multimétert, melyekkel feszültséget mértem. Ezeket a műszereket „M1” és „M2” jelzésekkel jelöltem a kapcsolási rajzon. Az „M1”-es jelzésű multiméterrel mértem a változtatható ellenállású ellenálláson eső feszültséget, az „M2”-es jelzésű műszerrel pedig az 1Ω -os söntellenálláson eső feszültséget mértem, ami tulajdonképpen a körben folyó áram értékét adta meg, hiszen Ohm törvénye szerint 1Ω -os ellenállást használva a

feszültség értéke egyenlő az áramértékkel. A körben folyó áram mérésére, azért használtam egy feszültségmérőt és egy ellenállást egy darab árammérő helyett, mert így pontosabban tudtam elvégezni a mérést.



11. ábra A kapcsolás összeállítva [saját kép]

A söntellenállás hőmérsékletfüggését kísérleti úton megmértem, empirikus megfigyelés alapján az ellenállás értékeiben nem tapasztaltam változást a hőmérséklet változásával, így elmondható, hogy a söntellenállás értéke konstans 1Ω volt a mérés során. A tolóellenállás értékét előre meghatározott pontok alapján változtattam, melyek egyenlő távolságra voltak egymástól. A mérés során a tolóellenálláson eső feszültség leolvasása és rögzítése után, mindig változtattam az ellenállás értékén, majd újra rögzítettem a mért adatokat így haladva végig az összes ponton. A végállásba érve visszatértem az első jelölt pontra, majd folytattam a mérést, figyelve a panel hőmérsékletnövekedésére és az azt érő beeső fény intenzitásának értékére. Tekintettel arra, hogy laboratóriumi körülmények közt végeztem el a mérést, elmondható, hogy a fény beesési szöge a lehető legideálisabb volt, hiszen a napszimulátor közvetlen a napelem felett helyezkedett el, így merőlegesen érte a panelt a beeső fény. A napszimulátoron három kapcsoló

segítségével lehetőségem volt kék, sárga és piros fények változtatására. A mérés alatt mind a három lámpa típus fel volt kapcsolva. Ahogyan fentebb is olvasható a fényintenzitás mérésére egy Steca fényintenzitás mérő műszert használtam. A műszert a fényforrás alá helyezve megmértem a rajta eső feszültséget egy multiméter segítségével, majd rögzítettem a mért eredményt. A műszer gyári adatlapját használva a mért feszültségértéket átváltottam egységni felületre eső fényintenzitásértékre. A méréseim során a fényintenzitás értéke 180 W/m^2 volt.



12. ábra Fényintenzitásmérő a napszimulátor alatt [saját kép]

A kísérleteimet egymás után ötször hajtottam végre. A mérési sorozat elvégzésével a napelem modult visszahűtöttem szobahőmérsékletűre. A modul hőmérsékletében a hőmérsékletváltozás minimálisnak mondható. Kísérleteim során

azt tapasztaltam, hogy a modul hőmérséklete 1-2 C-ot emelkedett. Ezután a fényforrást magasabbra helyeztem és újra mérni kezdtem ugyan ezzel a metódussal. A fény intenzitásértékét viszont újra kellett mérnem, hiszen megemeltem a napszimulátort ezáltal változott a fényintenzitás is.

4.1 Első mérés eredményeinek ismertetése

Az így kapott feszültség- és áram értékeket rögzítettem egy Excel táblázatba, ahol kiszámoltam ezen adatok átlagát és szórását. Az így kapott eredményeket importáltam a MATLAB-ba, majd a szoftver segítségével kirajzoltattam a napelem villamos áram-feszültség adatpontját. A megkapott adatpontokra a villamos áram-feszültség karakterisztika egyszerűsített egyenletét illesztettem.

Mérés sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U1 [V]	0,16	6,4	12,5	17,1	18,1	18,43	18,6	18,7	18,8
I1 [A]	0,14	0,13	0,1	0,1	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
U2 [V]	0,13	6,4	13	17,3	18	18,4	18,6	18,7	18,8
I2 [A]	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
U3 [V]	0,17	6,2	12,2	17,1	18	18,3	18,5	18,6	18,7
I3 [A]	0,14	0,14	0,1	0,1	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
U4 [V]	0,18	7,2	12,7	17,1	17,9	18,3	18,4	18,6	18,6
I4 [A]	0,14	0,13	0,1	0,1	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04
U5 [V]	0,13	6,2	12,9	17,1	17,9	18,2	18,4	18,5	18,6
I5 [A]	0,14	0,13	0,1	0,1	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04

13. ábra Az első mérés eredményei [saját ábra]

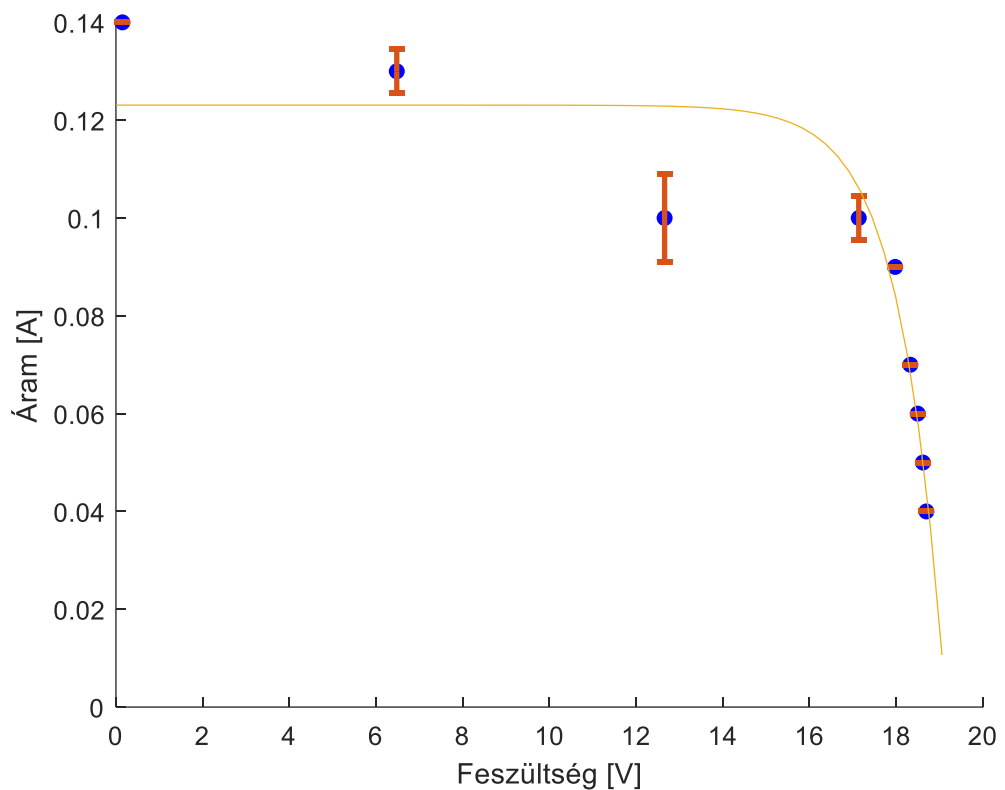
A legfelső sorban egytől kilencig számozva jeleztem a tolóellenálláson előre meghatározott pontokat. A feszültség és az áramértékek mögötti számok – egytől ötig – pedig a mérés sorszámaát mutatják. Láthatjuk, hogy a mért értékek között nagyon kicsi, csupán néhány tized, esetleg század az eltérés. Megfigyelhetjük, hogy az áram- és feszültségértékek között fordított arányosság van, az áramértékek csökkenésével nőnek a feszültségértékek.



14. ábra A fényintenzitásmérőn eső feszültség mérése digitális multiméterrel [saját kép]

A fényintenzitásmérőn eső feszültség 0.066 V volt az első mérés során, tehát a besugárzás értéke a gyári adatlap szerint 180 W/m^2 .

A napelem áram-feszültség adatpontjait a feszültségek és áramok átlagait felhasználva rajzoltattam ki. Az áramok szórását, vagyis az átlagtól való átlagos eltérésüket is ábrázoltam a MATLAB segítségével errorbarok formájában. A 15. ábrán látszik, hogy egyes errorbar-ok (az adott mérési ponthoz tartozó szórás) esetén az szórás értéke 0, vagy konvergál a 0-hoz.



15. ábra Az első mérés eredményeinek ábrázolása [saját kép]

A 15. ábrán látható kék pontok az átlagokból kirajzoltatott áram és feszültségpontok, melyeken megfigyelhetjük a piros errorbarokat, amik az áramértékek szórását mutatják. A vízszintes tengelyen lévő villamos feszültség látható. Az adatábrázolásból származó nehézségeim miatt a villamos feszültségek szórását nem tudtam ábrázolni. A 13. táblázat alapján a feszültség értékek átlag közüli ingadozása minimálisnak mondható. Továbbá, az ábrán látható az illesztett görbe, amely jól lefedí az átlagértékeket. Az átlagértékek kis hibával, közel helyezkednek el a görbe körül és láthatjuk azt is, hogy a karakterisztika kezdő- és végpontján nincs szórás. Az illesztés hibája 0.901 lett. A görbeillesztéshez a következő egyenletet használtam fel: $y = -b(\exp(cx)) + a$, ahol $a = 0,123$, $b = 7,68 \cdot 10^{-10}$ és $c = 0,986$.

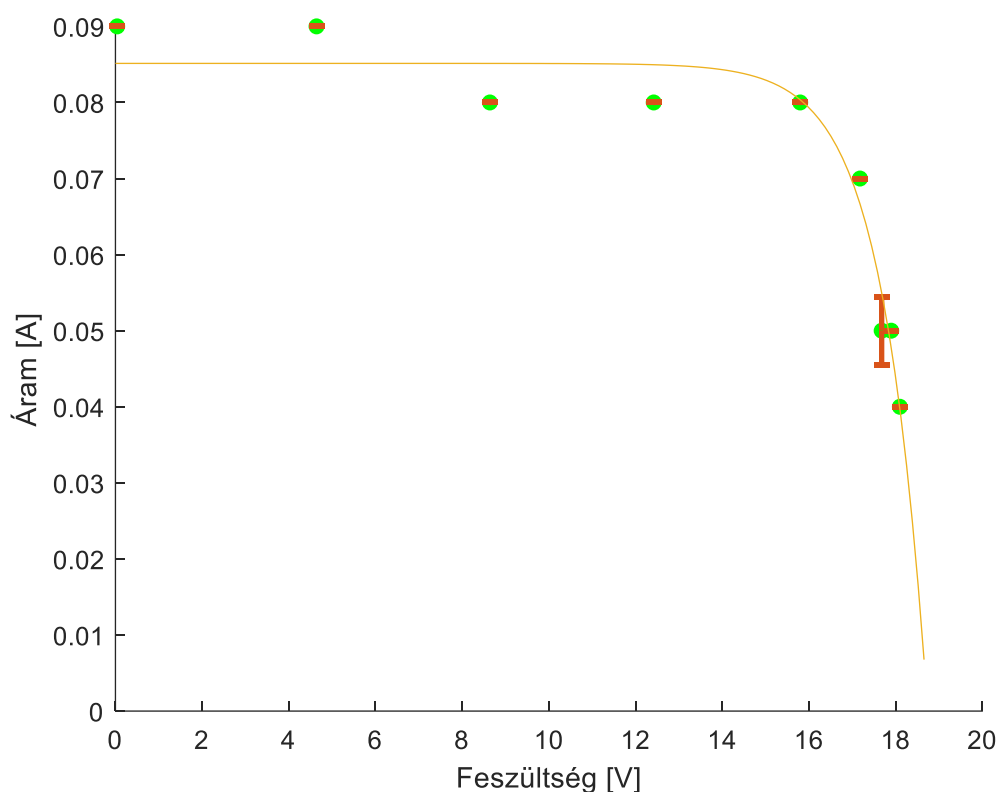
4.2 A második mérés eredményeinek ismertetése

Ahogy korábban is írtam a második mérés során mindent ugyan úgy csináltam, csak a napszimulátort emeltem magasabbra, növelve ezzel a távolságot a fényforrás és a napelem között. Így, hogy messzebből érte a fény a napelemet újra kellett mérnem a fényintenzitást is. Ebben az esetben a fényintenzitásmérőn eső feszültség 0.041 V volt, tehát a besugárzás értéke a gyári adatlap szerint 110W/m^2 volt.

Mérés sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U1 [V]	0,06	4,7	8,8	12,5	15,8	17,3	17,8	18	18,2
I1 [A]	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
U2 [V]	0,04	4,6	8,6	12,4	16	17,2	17,7	17,9	18,1
I2 [A]	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
U3 [V]	0,03	4,6	8,7	12,4	15,7	17,2	17,7	17,9	18,1
I3 [A]	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
U4 [V]	0,03	4,6	8,6	12,5	15,7	17,1	17,6	17,9	18,1
I4 [A]	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
U5 [V]	0,03	4,7	8,5	12,3	15,8	17,1	17,6	17,8	18
I5 [A]	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04

16. ábra A második mérés eredményei [saját ábra]

Megfigyelhetjük, hogy miután megemeltem a napszimulátort a kezdő feszültség- és áramértékekben jelentős csökkenést tapasztalhattam és a tolóellenállás különböző állásai mellett is folyamatosan kisebb értékeket mértem. Ez a különbség a fény besugárzási értékének csökkenése miatt van.



17. ábra Második mérés eredményeinek ábrázolása [saját ábra]

Ebben az esetben is a zöld pontok az átlagokból kirajzoltatott áram és feszültségpontok. Megfigyelhetjük, hogy a második mérés során az áramértékek szórása egyetlen egy eset kivételével minden pontban nulla, ezért láthatunk csak egy darab errorbart a 17. ábrán. Az illesztett görbe ebben az esetben is jól illeszkedik, közel helyezkednek el hozzá az átlagértékek. A második mérés során, megemelet fényforrás mellett az illesztés hibája 0,950 lett, itt is az $y = -b(\exp(cx)) + a$ egyenletet használtam a görbeillesztéshez, ebben az esetben az $a = 0,0851$, $b = 9,28 \cdot 10^{-10}$ és $c = 0,978$.

4.3 Mérés kiértékelése

Mivel a szakdolgozatomhoz készített mérésemet laboratóriumi körülmények között végeztem, ezért elmondható, hogy a mérés során minden a lehető legideálisabb volt. Nem melegedett túl a napelem az azt érő fény hatására, a fény beesési szöge az egész mérés alatt 90° volt és minden időpillanatban érte a napelem felületét a fény. Ezeknek a tényezőknek köszönhetően elmondható, hogy a kísérlet sikeres volt, a mért eredményeim pontosak, szép áram-feszültség karakterisztikákat kaptam. Annak ellenére, hogy mértem a mérés során a napelem hőmérsékletét nem használtam fel végül a mért adatokat, hiszen a napelem hőmérsékletnövekedése annyira kicsi volt, hogy figyelmen kívül hagytam. A mért eredmények szórásértékeiről elmondható, hogy majdnem minden esetben nulla, ami szintén kedvező eredmény. Az illesztett görbékhez is közel helyezkednek el az ábrázolt áram és feszültségértékek átlagai. A görbeillesztések is jól sikerültek, mindkét esetben 1-hez közeli a korreláció értéke.

5 ÖSSZEFOGLALÁS

Szakedolgozatom elején felhívtam a figyelmet korunk egyik megoldandó problémájára, az évről évre nagy tempóban növekvő energiaigényekre, majd bemutattam a fotovillamos modulok és gyártási technológiájuk fejlődésének folyamatát. Összehasonlítottam a megújuló energiaforrásokból származó energiaárakat a fosszilis üzemanyaggal üzemeltetett erőművekben előállított energiaárakkal az évek során. Ezután egy újabb jelenkori problémáról írtam, a klímaváltozásról és a globális felmelegedésről. Ismertettem, hogy milyen tényezők és hogyan változtatják meg a Föld légkörének összetételét és a fosszilis erőművek szerepét ebben a káros folyamatban.

Ezt követően rátértem szakdolgozatomban fő témájára, a fotovillamos modulok biztonságtechnikai minősítésére. Azonban, annak érdekében, hogy a témáról teljes, átfogó képet biztosíthassak ismertettem napelemek alapjául szolgáló félvezetőket, kémiai tulajdonságaikat és előállításuknak folyamatát. Következő lépésként bemutattam a napelemek működését, kitértem a napelemek gyártási folyamataira, típusaira. Ismertettem az egyes típusok villamos paramétereit, jellemzőiket, előnyeiket és hátrányaikat. Bemutattam egy háztartásméretű napelemes rendszer részeit, kitértem a rendszert alkotó berendezések szerepére a rendszeren belül.

Az MSZ EN IEC 61730 szabvány szerint ismertettem a fotovillamos modulokkal szemben támasztott követelményeket. Ismertettem, hogy a szabvány milyen villamos paraméterű és milyen érintésvédelmi osztályokba tartozó napelemekre vonatkozik. Bemutattam azon érintésvédelmi osztályba tartozó napelemek védelmi részeit, hozzáférhetőségeit melyekkel foglalkozik a szabvány. Ismertettem a szabvány követelményeit az eltérő áramütés elleni védelmi osztályba sorolt fotovillamos modulokkal szemben, továbbá részleteztem a fotovillamos modulok szerkezeti részeivel, csatlakozásaikkal, összeköttetésekkel, bypassdiódáikkal és a napelemek szállításával és összeállításával szemben támasztott követelményeket a szabványra hivatkozva.

Szakedolgozatomhoz elvégzett mérésemben laboratóriumi körülmények között vizsgáltam egy monokristályos napelem áram-feszültség karakterisztikáját, eltérő megvilágítások mellett. A mért értékeket Excel és MATLAB szoftverekkel dolgoztam fel. A kísérlet végére rengeteg új készséget sajátítottam el. Új ismeretekre tehettem szert a MATLAB-ban, megtanultam adatokat importálni, ezen, importált adatokra görbét illeszteni, elsajátítottam ezen adatok szórásértékeinek ábrázolását errorbarok segítségével. Nem utolsósorban sokat tanultam a napelemek áramtermeléséről is a fényintenzitás függvényében és jártasabbá váltam kapcsolások összeállításában is.

6 SUMMARY

At the beginning of my thesis, I drew attention to one of the problems of our century, the rapidly increasing energy demands year by year. The development of photovoltaic modules and their manufacturing technology were described in details. The energy prices from renewable energy sources were compared to energy prices from fossil fuel power plants over the years. Then I wrote about another problem of our time, the climate change and global warming. I described what factors and how they change the composition of Earth's atmosphere and the role of fossil power plants in this damaging process.

Then I moved on to the main topic of my thesis, the safety certification of photovoltaic modules. However, in order to provide a complete and comprehensive picture of the subject, I have described the semiconductors on which solar cells are based, their chemical properties and the process of their production. Then the operation, the manufacturing process and types of solar cells were described. The electrical parameters of each type, their characteristics, advantages and disadvantages were also described. I have also presented the parts of a household sized solar system and the role of each equipment within the system.

The requirements for photovoltaic modules according to the standard MSZ EN IEC 61730 were described. I have described the electrical parameters and the contact protection classes of the solar modules covered by the standard. I presented the protection parts and accessibility of the contact protection classes of solar cells covered by the standard. I have described the requirements of the standard for photovoltaic modules of different classes of protection against electric shock, and I have detailed the requirements for the structural parts of photovoltaic modules, their connections, interconnections, bypass diodes and the transport and assembly of solar cells with reference to the standard.

In my measurements for my thesis, I investigated the current-voltage characteristics of a monocrystalline solar cell under different illumination conditions in a laboratory. I have processed the measured values using Excel and MATLAB

software. By the end of the experiment I had acquired a lot of new skills. I have learned new skills in MATLAB, I have learned how to import data, how to fit a curve to this imported data, I have also learned how to plot the standard deviation of this data using errorbars. Last but not least, I have learned a lot about the power generation in solar cells as a function of light intensity and became more skilled in the assembly of circuits.

7 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- [2] <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth> (by Max Roser December 01 2020)
- [3] <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>
- [4] <https://www.fastcompany.com/90583426/the-price-of-solar-electricity-has-dropped-89-in-10-years>
- [5] <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [6] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/introduction/the-greenhouse-effect>
- [7] <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [8] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/basics>
- [9] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials>
- [10] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-structure>
- [11] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/68/Covalent_bonding_in_silicon.svg
- [12] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/conduction-in-semiconductors>
- [13] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/doping>
- [14] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-of-light>
- [15] <https://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/PN-Junction/Images/absorpt.png>
- [16] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient>
- [17] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-depth>
- [18] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/generation-rate>

- [19] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/recombination>
- [20] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/types-of-recombination>
- [21] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/movement-of-carriers-in-semiconductors>
- [22] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/diffusion>
- [23] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/formation-of-a-pn-junction>
- [24] <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Silicon>
- [25] <https://www.vgfszaklap.hu/hirek/4518-a-szilicium-utja-a-napelemig>
- [26] <https://www.halbleiter.org/en/waferfabrication/singlecrystal/>
- [27] https://www.researchgate.net/figure/Photograph-of-a-silicon-CZ-puller-with-200-mm-crystal-Wacker-Siltronic-AG_fig1_304102101
- [28] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/surface-texturing>
- [29] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/texturing>
- [30] <https://solarpoweredblog.com/solar-pv/>
- [31] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure>
- [32] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-structure>
- [33] Armin Rauber: Napelem technológiák és jellemzőik, Soltrain - G04 előadás
- [34] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-materials>
- [35] <https://www.ecowatch.com/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels-2654716551.html>
- [36] https://m.blog.hu/na/napelem/image/monokristalyos_napelem.jpg
- [37] https://m.blog.hu/na/napelem/image/polikristalyos_napelem_1.jpg

- [38] <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>
- [39] <https://solar-kit.hu/napelemes-rendszer-reszei/>
- [40] <https://solar-kit.hu/napelemes-rendszer-reszei/>
- [41] <https://www.mnnsz.hu/napelem-optimalis-tajolasa/>
- [42] https://napelem.blog.hu/2018/01/26/napkoveto_napelemes_rendszer
- [43] <https://www.eu-solar.hu/blog/a-bifacialis-napelemek-hamarosan-elarhetoek-lesznek-az-eu-solar-kinalataban/>
- [44] MSZ EN IEC 61730
- [45] MSZ EN IEC 61730
- [46] MSZ EN IEC 61730
- [47] MSZ EN IEC 61730
- [48] MSZ EN IEC 61730
- [49] MSZ EN IEC 61730
- [50] MSZ EN IEC 61730
- [51] MSZ EN IEC 61730
- [52] MSZ EN IEC 61730
- [53] MSZ EN IEC 61730