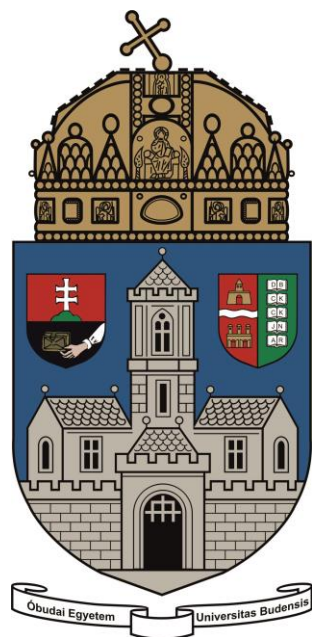


A NAPELEM CELLA RÖVIDZÁRÁSI ÁRAMÁNAK VIZSGÁLATA A BESUGÁRZÓ FÉNY HULLÁMHOSSZÁNAK FÜGGVÉNYÉBEN



Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

Hallgató neve: **Libor János**

Témavezető: **Ph.D. Dr. Rác Ervin**

Budapest, 2014. április 14.

Tartalomjegyzék

1.BEVEZETÉS	4
1.1 Napenergia, mint megújuló energiaforrás	4
1.2 Energetikai szempontok	4
1.3 Téma bevezetése	5
2.A NAPSUGÁRZÁS FIZIKAI JELLEMZŐI	7
2.1 A napsugárzás spektruma	7
2.2 Hőmérsékleti sugárzás.....	8
2.3 Foton energiája	9
2.4 Teljesítménysűrűség.....	11
2.5 Spektrális sugárzás	12
3.NAPELEM FIZIKAI TULAJDONSÁGAI	14
3.1 QE –Részecskehatékonyság	14
3.2 A spektrális válasz függvény.....	15
3.3 Spektrális válasz A/W -ban	17
3.4 Félvezetők fizikája	18
3.5 A napelem villamos helyettesítő vázlata	19
3.6 Fotovoltikus hatás.....	20
3.7 Kitöltési tényező (Fill Factor, FF)	21
3.8 Napelem hatásfoka	22
3.9 Rövidzárási áram.....	23
3.10 Üresjárási feszültség.....	25

4. MÉRÉS	26
4.1 Mérési eszközök ismertetése	26
4.2 A mérési elrendezés, mérés leírása	31
4.3 A mérési környezeti feltételek.....	32
5. MÉRÉSI EREDMÉNYEK.....	33
5.1 A mérés körülményeiről.....	36
6. MÉRÉS ÉRTÉKELÉSE	37
6.1 A mérés hibája.....	44
7. A PROBLÉMA MEGOLDÁSAINAK LEHETŐSÉGEI.....	46
IRODALOMJEGYZÉK	49

1.Bevezetés

1.1 Napenergia, mint megújuló energiaforrás

Manapság fontos kérdéssé vált környezetünk szennyezése és ennek okozója a fosszilis energiahordozók nagymértékű használata. (A világ energiatermelésének 87%-át a fosszilis energiahordozók segítségével állítják elő [1].) Ezekkel a konvencionális energiahordozók elégetésével üvegházhatást okozó gázok kerülnek a légkörbe, s mindez károsítja környezetünket, ami által a Föld átlaghőmérséklete emelkedik.

Az egyik fő cél a jövőben, a fosszilis energiahordozók kiváltása, alternatív megoldások segítségével, ezek a megújuló energiaforrások használatával lehetségesek. Köztük az egyik legnagyobb potenciállal rendelkező energiaforrás a Nap. Földünket érő sugárzási energia olyan hatalmas, hogy egy óra leforgása alatt biztosítani tudná az emberiség éves energiaigényét [2]. Ezért ígéretes fejlesztési, kutatási területet jelent a napenergia felhasználása.

A napsugárzás villamosenergiaként történő hasznosításának két útja van, egyik a közvetett, a másik a közvetlen átalakítás. A közvetett energiaátalakítás azt jelenti, hogy napkollektor segítségével a napenergiát hővé alakítjuk és ebből, hő-körfolyamat segítségével állítjuk elő a villamosenergiát. A közvetlen átalakítás eszköze a napelem, amely biztosítja a napenergia villamosenergiává való átalakítást.

A dolgozat a közvetlen típusú átalakító rendszereknek elektromos jellemzőit fogja vizsgálni a napsugárzás minőségétől (a megvilágítás hullámhosszától) függően.

A napsugárzás felhasználása fél évszázados múltra tekint vissza, viszont az utóbbi években kezdődött meg ennek az energiatermelőnek a nagyfokú kutatása és használata. Köszönhető az igen nagy anyagtechnológiai és gyártási folyamat elméleti és gyakorlati fejlesztéseinek, mint például a napkövető rendszerek, és más hatásfok növelő eljárások. Így a viszonylag költséges beruházás gyorsabb megtérülési idővel tud működni.

1.2 Energetikai szempontok

A fotovoltaikus energiatermelés fejlődését mi sem bizonyítja jobban, mint hogy a 2012-ben a világon 31 GW ilyen eszközt telepítettek. A telepítések 70%-át Európában végezték 2011-ben, míg 2012-ben 55%-át. 2012-ben Németország volt a legnagyobb piac, ahol 7,6 GW-os teljesítményt építettek be [3]. Ott már működik napelem újrahasznosító üzem is, ahol az elhasznált napelem modulokat 96%-ban képesek újra felhasználni [4]. 2012-ben Kínában 5

GW, Amerikában 3,3 GW–ot telepítettek. 2012-re a világ beépített fotovoltaikus rendszerei tízszeresére növekedtek az utóbbi öt év alatt. 2017- re a jóslatok szerint, ezen eszközöknek az éves gyártása elérheti a 60-70GW nagyságrendet [3].

Magyarországon 2012-ben mindössze 4 MW beépített energia volt található, ami megegyezik a megelőző év adatával [1]. Vagyis a bővülés hazánkban nem számottevő, a kis beépített energia ellenére. Ez magyarázható a viszonylag nagy bekerülési költség és az ebből fakadó hosszú megtérülési idővel. Remélhetőleg ezek az adatok megváltoznak az elkövetkező években, mivel jóval kedvezőbb adottságokkal rendelkezik hazánk az éves napsugárzási órák tekintetében, mint északabbra fekvő és a beépített energiában vezető Németország.

A politika is egyre nagyobb hangsúlyt fektet a megújuló energia alkalmazására. Ezt alátámasztja az Európai Bizottság 2020-ra vonatkozó célkitűzése is (3×20). A programot, az európai uniós tagállamoknak kell teljesíteniük. Követelménye, hogy 20%-kal csökkentsék az üvegházhatást okozó gázok kibocsájtását. Továbbá 20%-kal növeljék a megújuló energia részarányát a teljes energiatermelésben alkalmazott erőművek között, és 20%-kal növeljék az energiahatékonyságot [5].

Hazánkban főként háztartási kiserőművek formájában építenek ki napelemes rendszereket, hogy ilyen megoldással fedezzék energiatermelésük egy részét a háztartások. Ilyenfajta kiserőművek telepítésénél közgazdasági szempontok alapján viszonylag hosszú megtérülési idővel lehet számolni, mégis egyre elterjedtebbnek tűnik az országban, főként az észak-dunántúli területen ahol 2013-ban 592 ilyen kiserőmű épült [6]. A fővárosban és környékén a telepítések száma 788 volt, míg tiszántúlon 501 darab volt [6]. Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal által kiadott adatsor szerint a telepítések száma 2013-ban összesen 2997 darab volt, ezeknek a telepítése nem volt engedélyköteles, mivel fél megawattnál kisebb energiatermelésre képesek [7]. Az adatsorból további fontos információnak számít, hogy a háztartási kiserőművek közt a fotovoltaikus rendszerek szerepelnek a legnagyobb mértékben a telepítési és a beépített energia szempontjai alapján, a többi megújuló energiaforrás, mint például szél-erőmű elenyésző mértékben van jelen.

1.3 Téma bevezetése

A dolgozat célja, hogy egy monokristályos szilícium alapú napelem villamos paraméterének megváltozását vizsgálja egy jól meghatározott külső feltétel változása mellett. Ilyen külső hatás-változásokkal lehet laboratóriumban szimulálni a napelem villamos paramétereit befolyásoló környezeti feltételek megváltozásának hatását, mivel a napelemek

nem állandó külső paraméterekkel dolgoznak (pl.: meteorológiai változások). Mérés történhet például a besugárzott fényintenzitás nagyságának függvényében, a napelemre beeső fény szögének megváltozásának függvényében, illetve a besugárzott fény hullámhosszának változtatásának függvényében is. Mindegyik mérés gyakorlati jelentőséggel bír, mivel sokféle tényezőtől függ a napelem által megtermelt villamos energia nagysága. Ilyenfajta mérések elsődleges célja a napelem villamos paramétereinek vizsgálata, és fejlesztés útján annak optimalizálása.

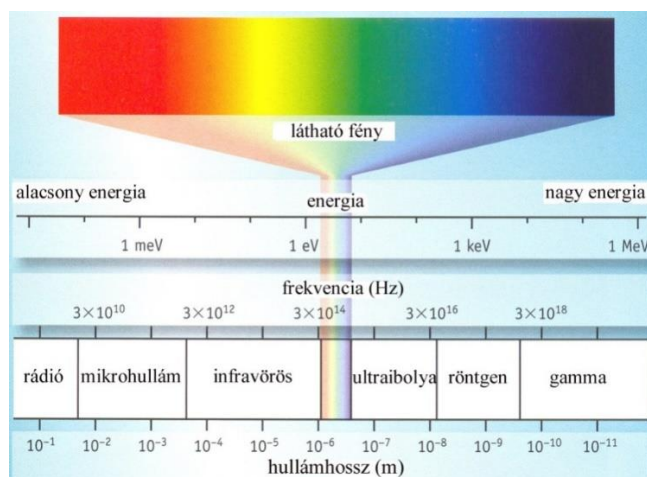
A következő fejezetekben **a napelemek rövidzárási áramát fogom vizsgálni a besugárzott fény hullámhosszának megváltoztatása függvényében**. Ez a téma azért is jelentős, mert a napsugárzásban a különböző fény hullámhosszak más-más intenzitásban találhatók meg. A Földre érkező fény hullámhossz intenzitását meghatározza például a fény által megtett úthossz is. Ez a jelenség az ember által is érzékelhető, pl. amikor napfelkelte, illetve naplemente történik. A fény kis beesési szög mellett hosszabb utat kell, hogy megtegyen, míg a Földre érkezik, nagyobb légtömegben kell áthaladnia és így az abszorpció jelensége erősebben figyelhető meg alacsony hullámhosszaknál. A hosszú hullámhosszú fény, mint például a vörös, képes áthaladni ezen a légtömegben, ezért látjuk az ég alját vörösnek. (A napfény kék komponensei erősebben szóródnak a légkörön.) Ilyen esetben a fény egyes színeinek intenzitása megváltozik és befolyásolhatja a napelem villamos paramétereit, ezáltal hatásfokát. Gyártás, és fejlesztések során egy fontos szempont lehet a napelemet ért egyes fény hullámhosszak hatását vizsgálni, és ennek megfelelően új technika kialakítást alkalmazni, hogy a legjobb villamos választ érjük el.

A dolgozat első részében foglalkozom a Nap által kibocsájtott fotonok fizikai jellemzőinek, és a Földre érkező fény összetételének bemutatásával, annak érdekében, hogy a mérés során kapott eredményekre fizikai magyarázatot kaphassunk. A második részbe foglaltam a félvezetőkben lezajló folyamatok leírását, és a napelemek spektrális válaszána fogalmát és jelentőségét. A harmadik részben a mérési összeállítás részletes leírása található, a negyedik rész foglalja magába a mérési eredmények ismertetését táblázatos formában, és grafikus ábrázolásban. Az ötödik részben a mérés értékelése és a mérés hibája szerepel, a hatodik rész az összefoglalásé. Az utolsó egység pedig az ezen a területen manapság elért eredmények, amelyek már ennek a problémának a megoldási lehetőségeit, megoldásit írja le.

2.A napsugárzás fizikai jellemzői

2.1 A napsugárzás spektruma

Az alábbi képen láthatjuk a napsugárzás spektrumát.



1. ábra: Nap spektruma

Napelem vizsgálatánál szükséges a cellát ért sugárzás hullámhossz-tartományát megvizsgálni. A sugárzás az ultraibolyától az infravörös tartományig terjedhet. Mérés során főként a látható fény és infravörös fény tartományban tudtam mérni, pontosabban a 380nm-840nm-ig. Az alábbi táblázat mutatja meg az egyes színekhez tartozó hullámhosszak, az emberi szem által látható fénytartományban.

Hullámhossz	Szín
380nm-435nm	ibolya
435nm-495nm	kék
495nm-560nm	zöld
560nm-590nm	sárga
590nm-630nm	narancs
630nm-780nm	vörös

1. táblázat: Az egyes színekhez tartozó hullámhosszak, az emberi szem által látható fénytartományban

A napsugárzás a világűrben gyengítés nélkül terjed, spektruma a Napból való kilépése után mindaddig nem változik, amíg a Föld atmoszféráját el nem éri. Ezt napelemeknél AM0-ás jelöléssel különböztetik meg a légkörben terjedt fénytől. A sugárzási spektrumra hatást gyakorolnak a Nap légkörében lévő elemek, mint például, He, H. A világűrben spektrumot befolyásoló tényezők nincsenek. Ahogy a Föld légkörét a fény eléri, ismét érik olyan hatások, amire a teljes spektrum gyengítést szenved, illetve a spektrumból egyes hullámhossz vonalak eltűnnek (Fraunhofer-féle vonalak). Az abszorpció a Föld légkörében lévő elemeknek is köszönhető, mint pl.: oxigén, széndioxid, ózon, vagy más légköri elemek, por szemcsék illetve vízpára. Az AM jelölést annak érdekében vezették be, hogy mérések során figyelembe vehetők legyenek a légköri hatások és a gyakorlatban szokványos beesési szögek. AM0 jelölés általában a légkörön kívül használt napelemeknél válik fontossá. A Földön alkalmazott napelemeknél az AM1 jelölést használják, ami azt jelenti, hogy 90°-os beesési szög mellett, vagyis egyszeres légköri gyengítés esetén a napelemet ért fény intenzitása a napállandótól (1353 W/m^2) mennyivel tér el. AM1 esetén a gyengítés jól észrevehető, mivel az értéke 925 W/m^2 . Gyakorlatban elterjedt az AM1,5 és AM2 jelölési is, ami 45° és 60°-os napsugárzási beesési szöget jelent [2].

2.2 Hőmérsékleti sugárzás

A Nap által kibocsájtott fény összetételét vizsgálni lehet az intenzitás függvényében, ha a Napot a vele megegyező hőmérsékletű fekete testel, helyettesítjük. A sugárzás eloszlása nem függ az anyagi jellemzőtől csak a hőmérséklettől. A kisugárzott teljesítmény a hőmérséklet negyedik hatványával arányos (Stefan-Boltzmann-törvény).

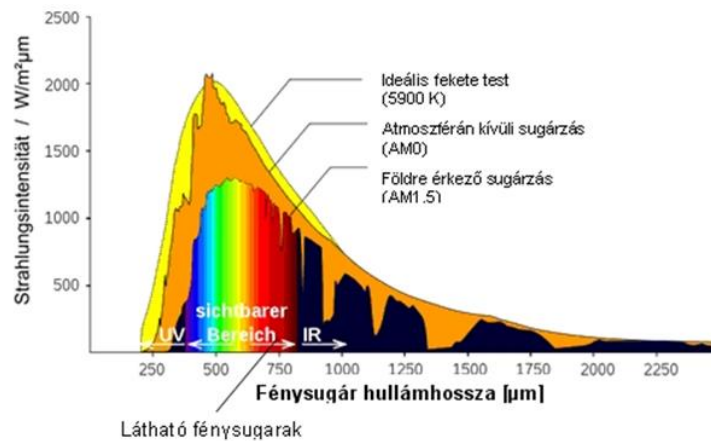
$$E = \sigma T^4$$

Ahol a (σ) a Stefan-Boltzmann állandó. A Wien-féle hullámhossz-eltolódás alapján a maximálisan kisugárzott hőmérsékleti sugárzások, a rövid hullámhosszak felé tolódnak el növekvő hőmérséklet hatására. Vagyis a különböző hullámhosszaknál a kisugárzott intenzitás más-más értékű. Meghatározható az alábbi képlet segítségével, hogy az adott hőmérsékletű fekete test melyik hullámhossz-tartományban bocsájtja ki a legnagyobb intenzitású sugárzást.

$$\lambda_p(\mu m) = \frac{2900}{T}$$

Ahol λ_p az a hullámhossz, ahol a kibocsájtott intenzitás a legnagyobb, a T a fekete test hőmérséklete kelvinben.

A Nap hőmérséklete körülbelül 5900K, ezért a fenti képletbe helyettesítve azt kapjuk, hogy a legnagyobb intenzitást az 500nm környékén a kék-zöld átmenetének a színtartományban van, amint az alábbi képen is látható (2. ábra). A 2. ábra megmutatja AM0-ás napsugárzás esetén a spektrum-eloszlás intenzitását és AM1,5 feltételek mellett a Földre érkező sugárzási intenzitást.



2. ábra: A napsugárzás fényintenzitásának megváltozása a hullámhossz függvényében
(ideális, AM0-ás, AM1,5 sugárzás esetén)

Fontos megfigyelés, hogy a Földre érkező fény spektrumában, a kisebb hullámhosszaknak az intenzitása nagyobb, mint a hosszabb hullámhosszaké.

Ezen fizikai jelenség tudatában a mérés során az alsóbb 450nm-600nm közötti hullámhossz tartományban, kiemelkedő villamos paramétereket kellene megfigyelni.

2.3 Foton energiája

A foton energiája nagyon fontos fizikai jellemző, mivel félvezetők esetén az anyagi tulajdonságoknak (tiltott sáv nagysága) megfelelően nagy energiájú foton képes létrehozni elektron generációt. A foton energiája fordított arányban áll a hullámhosszal. Az energia az alábbi képlet alapján határozható meg.

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

A foton energiája függ a fény terjedési sebességétől ($c=2,998 \times 10^8 \frac{m}{s}$), a Planck állandótól ($h=6,626 \times 10^{-34} Js$), és a fény hullámhosszától (λ).

$$hc = (1,99 \times 10^{-25} Jm) \times (1eV \div 1,602 \times 10^{-19} J) = 1,24 \times 10^{-6} eVm$$

Vagyis a foton energiája eV-ban (elektronvoltban):

$$E(eV) = \frac{1,24}{\lambda(\mu m)}$$

A fenti képlet alapján könnyen kiszámítható, hogy az alacsonyabb hullámhosszú fény energiája nagyobb, mint a nagy hullámhosszú fénysugárzása.

Szín	Hullámhossz	Frekvencia ($f = \frac{c}{\lambda}$)	Foton energia
ibolya	380-435nm	789-689THz	3,26-2,85eV
kék	435-495nm	689-606THz	2,85-2,5eV
zöld	495-560nm	606-535THz	2,5-2,21eV
sárga	560-590nm	535-508THz	2,21-2,1eV
narancs	590-630nm	508-476THz	2,1-1,96eV
vörös	630-780nm	476-384THz	1,96-1,58eV

2.táblázat: Fotonokhoz tartozó szín, hullámhossz, frekvencia és energia-tartományok

Sugárzás	Hullámhossz	Frekvencia	Foton energia
Infravörös sugárzás	780-3000nm	384-100THz	1,58-0,41eV
Ultraibolya sugárzás	100-380nm	3000-789THz	12,4-3,26eV

3.táblázat: Infravörös és ultraibolya sugárzashoz tartozó hullámhossz, frekvencia és foton energia-tartományok

2.4 Teljesítménysűrűség

A teljesítménysűrűség egységnyi felületre érkező fotonok száma a foton energiákat is figyelembe véve. Fontos fizikai jellemző, mivel a napelem által előállított áram függ a generálódó elektronok számától, ami a felületre érkező teljesítménysűrűséggel arányban van (veszteségektől eltekintve). A teljesítménysűrűséget az egységnyi felületen úgy lehet meghatározni, hogy a fényáramot megszorozom az adott foton energiájával.

$$H\left(\frac{W}{m^2}\right) = \Phi \times \frac{hc}{\lambda}$$

$$H\left(\frac{W}{m^2}\right) = \Phi \times qE$$

Az elektron töltése $q = 1,6 \times 10^{-16} C$, a foton energiáját joule-ban kell megadni (Ws).

Vagyis a fenti képlet alapján könnyen belátható, hogy ugyanahhoz a sugárzási teljesítményhez kisebb fényintenzitás is elegendő rövid hullámhosszú fotonok esetén.

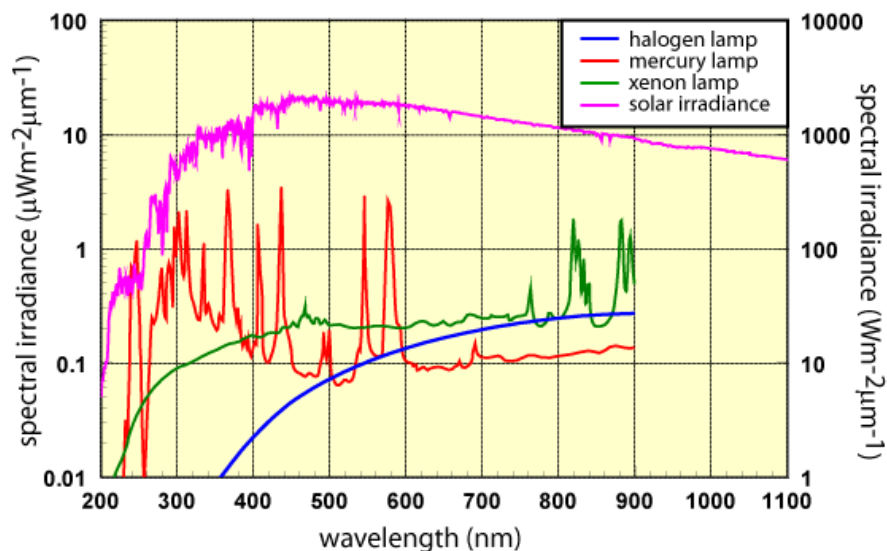
Foton hullámhossz (nm)	Szín	Fényáram ($m^{-2}s^{-1}$) (fotonok darabszáma egységnyi felületen egy másodperc alatt)	Foton energiája (eV)	Teljesítménysűrűség (W/m^2)
380nm	ibolya	$3 \times 10^{21} m^{-2}s^{-1}$	3,26eV	$1566 W/m^2$
550nm	zöld	$3 \times 10^{21} m^{-2}s^{-1}$	2,25eV	$1081 W/m^2$
780nm	vörös	$3 \times 10^{21} m^{-2}s^{-1}$	1,58eV	$759 W/m^2$

4.táblázat: Az egységnyi felületen létrejövő teljesítménysűrűség, adott fényáram és a hullámhossz függvényében

A fent említett táblázat szerint, a mért eredményeknél, kisebb hullámhosszak esetén kisebb fénysűrűség is elegendő, hogy ugyanaz a leadott villamos teljesítmény legyen észlelhető a napelem sarkain

2.5 Spektrális sugárzás

Néhány fényforrás spektrumát, azaz fényintenzitását a hullámhossz függvényében az alábbi ábra foglalja össze.



3. ábra: Napsugárzás és higany, xenon, halogénlámpa spektruma

Egy fényforrást ezzel a karakterisztikával a legkönnyebb jellemezni. A görbe megadja a különböző hullámhosszakhoz tartozó teljesítménysűrűséget a teljes spektrumban. A napsugárzás spektrális eloszlásához a higanylámpa és a xenon lámpa áll legközelebb a fényforrások közül.

A mérésem során az alkalmazott fényforrás egy xenon lámpa volt.

Napelem vizsgálatokor gyakran szükség van a fényáram és a fény spektrális eloszlására is.

$$F(\lambda) = \Phi E \frac{1}{\Delta\lambda}$$

(F) megadja a spektrális besugárzás mértékét $\left(\frac{W}{m^2} \mu m^{-1}\right)$

(Φ) a fényáram nagysága $(m^{-2} sec^{-1})$

(E) a foton energiája (Joule)

(λ) foton hullámhossza (m)

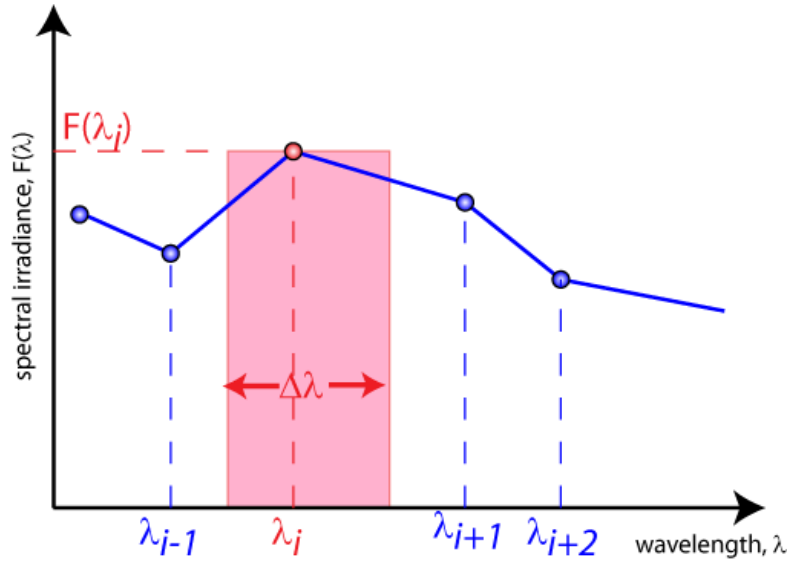
A teljes spektrumban a teljesítménysűrűség meghatározható. Egy adott hullámhossz intervallumban vagy a teljes spektrumban a fényforrás által kibocsájtott teljesítménysűrűséget az alábbi képlet írja le.

$$H(Wm^{-2}) = \int_0^{\infty} F(\lambda)d(\lambda)$$

A fényforrás által kibocsájtott teljesítménysűrűség (H)

Spektrális sugárzás (F)

Hullámhossz (λ)



4. ábra: Spektrális besugárzás eloszlás számítása meghatározott hullámhossztartományban

$$H = \sum_i F(\lambda)\Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{(i+1)} - \lambda_{(i-1)}}{2}$$

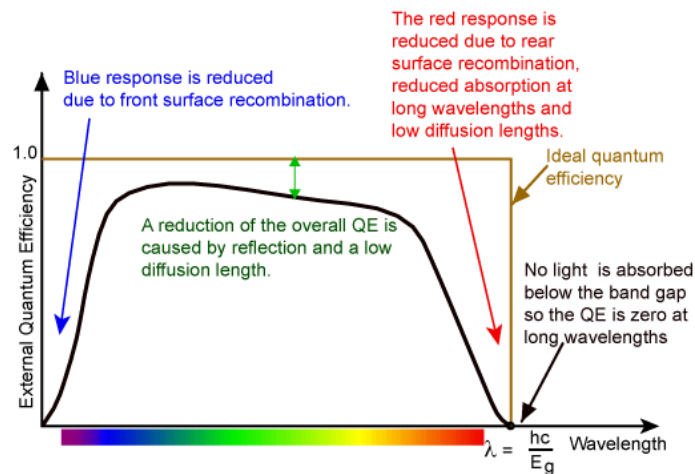
Az alábbi egyenletet lehet használni a fényforrás által kibocsájtott teljesítménysűrűség meghatározására, meghatározott hullámhossz intervallumban [8].

$$H_i = \Delta\lambda \times F(\lambda_i)$$

3.Napelem fizikai tulajdonságai

3.1 QE –Részecskehatékonyság

A részecskehatékonyság megadja a napelem cellába érkező fotonok számát a keltett töltéshordozók függvényében. A kvantumhatásfok megadható a hullámhossz függvényében illetve a foton energia függvényében. Ha a fotonok energiája a tiltott sáv átugrásánál kisebb energiával rendelkeznek, akkor a kvantumhatékonyság nulla. Akkor kapnánk ideális válaszfüggvényt, ha a napelem reakciója a beeső foton hatására egység ugrásnyi lenne, ezt az 5. ábrán barna vonallal jelölték. A legtöbb napelem cellánál az ideális egységugrástól való eltérés, nagymértékben a rekombinációnak és optikai veszteségeknek köszönhető.



5. ábra: Szilícium alapú napelem külső kvantumhatékonysága a hullámhossz függvényében

A Si napelem celláknál a külső kvantumhatékonyság a felület optikai jellemzője miatt tér el az ideális válaszfüggvénytől, például a transzmisszió (anyagon való áthaladás) vagy a reflexió (visszaverődés) mivel ezek veszteségek. A külső kvantumhatékonyság utal arra, hogy mennyi fotonot reflektál, transzmittál. Vagyis ebből megadható, hogy mennyi foton képes a generáció képzésre (elektron generációk képzésére), ha a beeső fotonok a megfelelő energia szinten vannak. Az 5. ábra megmutatja, hogy az alsó hullámhossz-tartományban a felületi rekombináció miatt kis értékű a kvantumhatékonyság, a zöld hullámhossz-tartományban a reflexió és a diffúziós úthossz miatt tér el az ideálistól, a vörös szín tartományban a napelem hátoldalán történő rekombináció miatt és a csökkenő foton energia miatt esik nullára a kvantumhatékonyság.

3.2 A spektrális válasz függvény

Fontos jellemző a napelem által adott válasz értéke a besugárzó fény frekvenciája függvényében. Ezt különböző fizikai, anyagi jellemzők befolyásolják úgy, mint

- tiltott sáv szélessége, átmenet mélysége, geometria elhelyezkedése
- rekombinációt elősegítő felületek elhelyezkedése

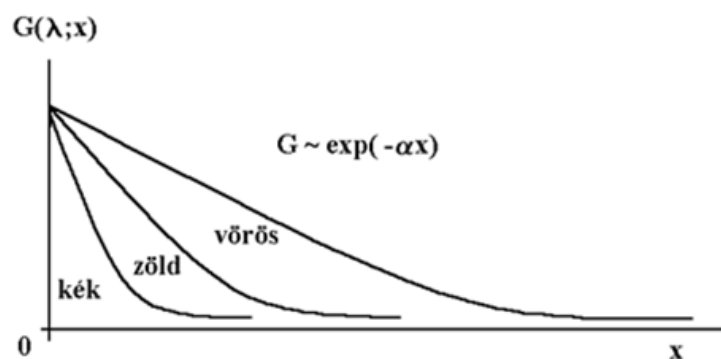
[9]

A generációs rátát az alábbi egyenlet adja meg:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x)$$

Ebben a formulában a $G(\lambda, x)$ a generációs ráta a hullámhossz (λ) és a felülettől való távolság (x) függvényében, (α) az anyagra jellemző abszorpciós tényező, $F(\lambda)$ a másodpercenként beeső fotonok száma egységnyi hullámhosszat tekintve, $R(\lambda)$ a visszavert fotonok hányad az egységnyi hullámhosszra nézve.

A válasz értéke a felület mélységének növekedésével exponenciálisan csökken. A válasz értékét még negatív irányba befolyásolja a reflektálódó fotonok száma is. A spektrális válaszfüggvény mérése fontos a napelem fejlesztése során, mivel ebből következtetni lehet a tervezés során a technológiai hibákra. Ha a válasz függvény az alacsonyabb hullámhosszaknál kisebb a vártnál, akkor a felület környezetében, míg a hosszú hullámhosszaknál a hátoldali kontaktus környezetében kell beavatkozni.



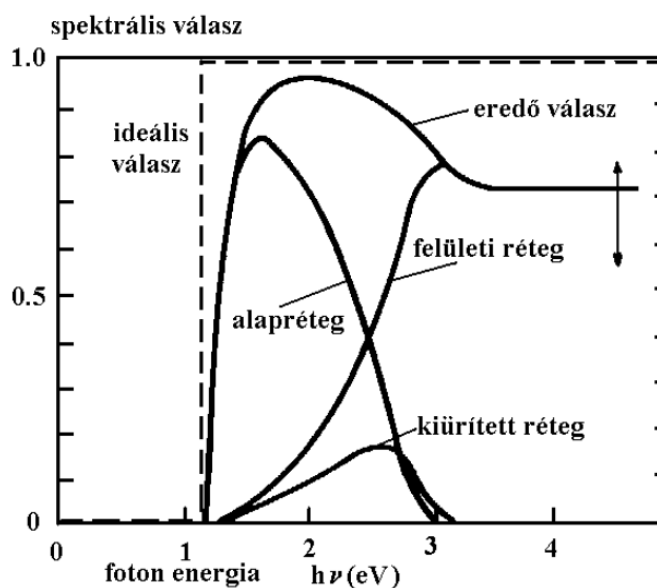
6. ábra: A generációs ráta az elnyelési mélység függvényében, különböző hullámhosszakhoz tartozó színek esetén

(6. ábra alapján jól megfigyelhető, hogy az egyes hullámhosszokhoz tartozó színek milyen mélységben hatolnak be az anyagba, ahol elnyelődnek, és elektrongenerációt tudnak létrehozni)

A spektrális válasz függvény az alsó hullámhossz tartományban (kék, ibolya tartomány), ahol a foton energiája meghaladja a 3eV-ot, a fény a felület legfelső rétegében fog elnyelődni („néhány tized mikrométeres tartományban”[9]). A felületi rekombináció miatt a foton válasz nem éri el az ideális értéket. A zöld fénynél a jelenség hasonló, a diffúziós út hosszú. Kis foton energiáknál az α (abszorpciós tényező) kicsi, ezáltal a generáció az anyag belsőbb rétegeibe fog áttevődni, a foton energia növekedésével az abszorpciós együttható növekszik és a generáció egyre jobban a felület felé fog kitolódni.

Az 5. ábra szerint, a mérés során a spektrális válasz figyelembe vételével a kis hullámhosszknál (nagy foton energiák esetén) a felületi abszorpció csökkentheti a napelem villamos paramétereit. Míg a nagyobb hullámhosszknál (kis foton energiák esetén) amíg el nem érjük a tiltott sávnál kisebb energiaszinteket a villamos válasz jobb lehet, mivel a foton eljut a félvezető anyag belsejébe és ott létre hozhat generációt, nem nyelődik el a felületen.

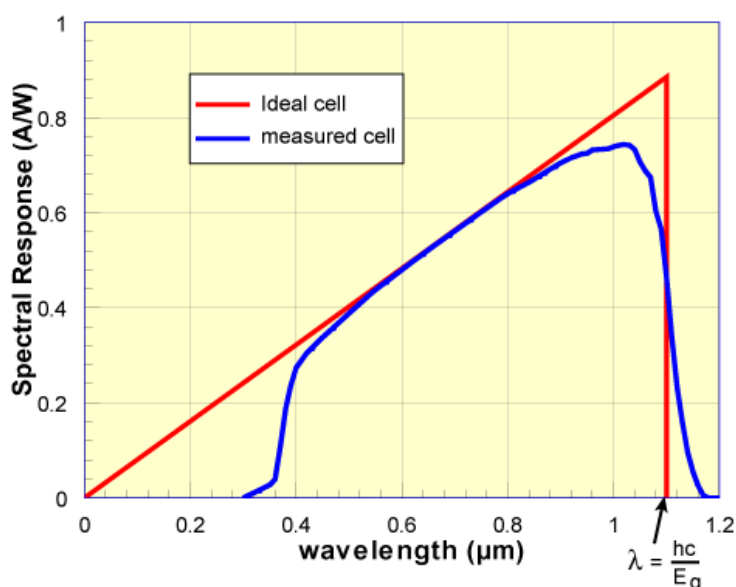
A 7. ábra megmutatja, hogy az energiaszintekhez tartozó fotonok a félvezető mely rétegében nyelődnek el és okoznak a napelemben generációt. Az eredő válasz esetén az ideális spektrális válaszhoz legközelebb a kisebb energiaszinttel rendelkező fotonok vannak körülbelül 1,7eV és 2,4eV közötti energia tartományban. Ezen tartományban a mért rövidzárási áramok értékek kiugróak lehetnek!



7. ábra: A kristályos szilícium anyagú félvezető különböző rétegeiben bekövetkező spektrális válasza a foton energiák függvényében

3.3 Spektrális válasz A/W -ban

A spektrális válasz megadja a napelem által termelt áramot a napelemre érkező teljesítmény függvényében, a hullámhossz megváltozását is figyelembe véve.



8. ábra: Napelem spektrális válasza a hullámhossz függvényében, ideális-, és mért esetben

Az Si napelem cellát általában a külső mechanikai védelem miatt üveg alatt helyezik el. Az üvegre jellemző, hogy az ultraibolya sugárzást megszűri, vagyis 400nm alatt az üveg elnyeli a sugárzás nagy részét. A közepes hullámhosszaknál a spektrális válasz ideálishoz közelít. A nagy hullámhosszú fotonok spektrális válaszána a határát a félvezetőre jellemző tiltott sáv nagysága határozza meg, ez az érték szilíciumnál $E_g = 1,12 \text{ eV}$ [2], ezért ha a foton energiája egy bizonyos hullámhossz érték felett van, a válasz nullára csökken. Ezek a fotonok, amiknek kisebb az energiája, mint a tiltott sáv átugrásához szükséges energia nem hasznosulnak, csak hőt keltenek a napelemben. A napelem cella meghatározott hullámhossztartományban működik, vagyis a tartomány alatt és felett a napelem spektrális válasza a fény intenzitástól függetlenül nulla.

A spektrális válasz számítása:

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE$$

$$SR = \frac{QE}{\lambda(\mu m)} 1239,8$$

Ahol SR a (Spectral Response) a spektrális válasz, mértékegysége $\left(\frac{A}{W}\right)$, a q az elektron töltésének nagysága, QE (Quantum Efficiency) a kvantumhatásfok.

A mérést csak a napelemre jellemző hullámhossz tartományban lehet majd elvégezni. A mérés során a hullámhossztól függően a napelem villamos válaszában alsó és felső határa is lesz ahol a rövidzárási áramértéknek nullára kell csökkennie.

Az alsó határ az ultraibolya sugárzás tartományában lesz észlelhető, ahol a napelemet védő üvegbúra fogja a sugárzást abszorbeálni (200nm alatt már a levegő is elnyeli az ultraibolya sugárzást). Továbbá a fénynek az a tulajdonsága, amely a rövid hullámhosszak felületi elnyelődésére jellemző.

A felső határ az infravörös sugárzás tartományában lesz, ahol a napelem rövidzárási áramának nullának kell lennie. Ez a fotonok lecsökkent energiája miatt következik be.

Ezért a mérés során a villamos válasz egy jól meghatározott hullámhossz intervallumon belül kell, hogy elhelyezkedjen.

3.4 Félvezetők fizikája

A félvezetők legnagyobb része kristályos szerkezetű, ami azt jelenti, hogy hosszú távú rendezettség uralkodik bennük. Vezetés során a legkülső elektronszféra kell figyelembe venni (a vegyérték és vezetési sávot). A vegyértéksávban az elektronok helyhez kötöttek, míg a vezetési sávban szabadon mozoghatnak. A félvezetőkre jellemző, hogy a két sáv között ún. tiltott sáv van, aminek energiája 0,7-3eV közé esik [1].

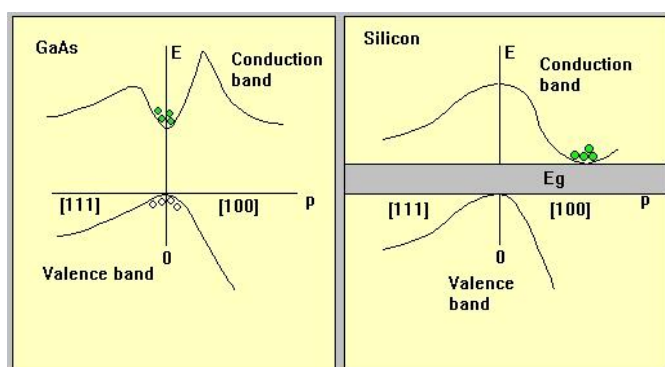
Ahhoz, hogy a vegyértéksávból a vezetési sávba kerüljön az elektronnak egy olyan megfelelő nagyságú energiával rendelkező fotonra van szüksége, ami az energiáját átadja. Ezt az Einstein-féle fényelektromos egyenlet írja le:

$$hf = \frac{1}{2}mv^2 + W_{ki}$$

Vagyis a hf megadja a foton energiáját, W_{ki} a kilépési munkát, ez esetben az elektronnak a munkáját, hogy átugorjon a tiltott sávon, ha a foton nagyobb energiájú volt, mint a kilépési

munkához szükséges energia, akkor a fennmaradó energia az elektron mozgási energiáját növeli. A kilépő elektronok száma függ a megvilágítás intenzitásától.

Fontos tulajdonság a vezetési és vegyértéksáv szélsőértékeinek helyzete. Ha ezek azonos hullámhosszra esnek (mint a GaAs alapú félvezetőknél), akkor ezt direkt sáv szerkezetnek nevezzük. Itt az abszorpció akár 6 nagyságrendet is nőhet [2]. Míg a Si, Ge esetében különbözőek a hullámhossz koordináták, ezért ezt indirekt sáv szerkezetnek nevezzük. Közvetett sávú félvezetőknél az abszorpció kisebb valószínűséggel jön létre, itt az energia és hullámszám (impulzus) egyidejű megmaradását követeli, amihez kell egy részecske a fonon ami általában rácsrezgésből keletkezik.



9. ábra: GaAs illetve Si félvezető anyagok elektromos sáv szerkezete a hullámhossztérben

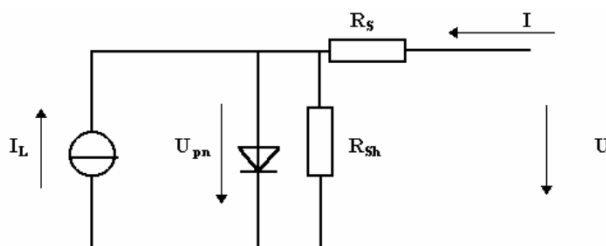
A félvezetők legfontosabb jellemzői:

- tiltott sáv nagysága
- tiltott sáv hullámhossz koordinátái direkt vagy indirekt szerkezetűek
- szabad töltéshordozók száma (lyukak, elektronok), ezt befolyásolja a félvezető szennyezettségének mértéke (donor, akceptor)
- szabad töltéshordozók generálása, rekombinálódásának nagysága a fény hatására

3.5 A napelem villamos helyettesítő vázlata

A napelem cellák villamos helyettesítő vázlatát a 10. ábra mutatja be, amellyel jól szimulálható a cellák elvi működése. Az áramgenerátor forrásárama a beeső fénysűrűséggel arányos, míg a vele párhuzamosan elhelyezett dióda a p-n átmenetbe lezajló folyamatokat jeleníti meg. A soros, párhuzamos ellenállások a cella ideálistól való eltérése miatt vannak, ezek az áramköri veszteségeket jelentik.

A soros ellenállás a kivezetések és kontaktusok ellenállását jelképezik. A párhuzamos ellenállás pedig azoknak a töltéseknek az áramértékét jelöli, amely a p-n átmenetet megkerülve rekombinálódnak és ezáltal veszteségként jelennek meg (szivárgó áram).



10. ábra: Napelem villamos helyettesítő vázlata

3.6 Fotovoltaikus hatás

A napelem cellák p-n átmenetektől épülnek fel, a félvezetőre jellemző tiltott sáv energiájával egyenlő vagy nagyobb energiával rendelkező fotonok képesek töltéshordozó párokat generálni, ezeket a p-n átmenet elektrosztatikus tere szétválasztja, ez a réteg igen vékony ($10^{-6} - 10^{-7}m$) ezért nagy potenciáltér alakulhat ki itt [2]. Az energiát a két oldalon felhalmozódott töltéshordozók jelentik. Az eszköz sarkaira kapcsolt feszültségmérővel és árammérővel mérhetjük az üresjárási feszültséget ($U_{ü}$) vagy a rövidzárási áramot (I_r). Ha az eszköz sarkaira ellenállást kapcsolunk és mérjük a rajta eső feszültséget, akkor azt tapasztaljuk, hogy az üresjárási feszültség lecsökkent egy U értékre. A lecsökkent elektromos tér hatására a töltéshordozók szétválasztása is lecsökken így a rövidzárási áram is lecsökken. A p-n átmenettel párhuzamosan kapcsolt áramgenerátor forrásárama arányos a beeső fénysűrűséggel és függ annak hullámhosszától. Az eredő áramot a sötétáram és a fotoáram különbsége adja.

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] - I_{foto}$$

$$I_r = -I_L = kI_{f0} \quad |U = 0V$$

I_L adja meg az n oldalon generálódott lyukak és p oldalon generálódott elektronok diffúzióját az átmenet felé, majd sodródási áramát az átmeneten keresztül, kiegészítve az átmenetben generálódott elektron-lyuk párok sodródásából adódott árammal.

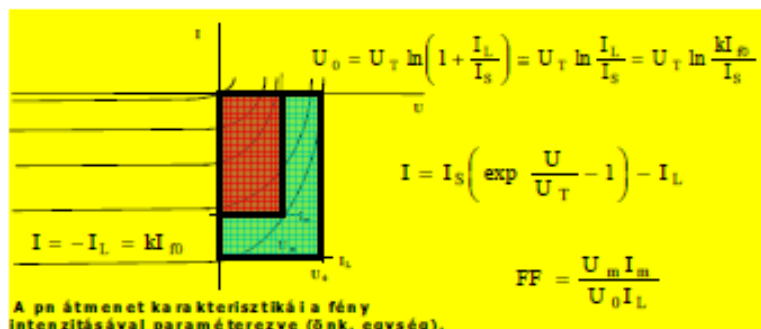
I_s adja meg a termikus generáció esetén szabaddá vált töltéshordozók diffúzióját az átmenet széléhez és a sodródási áramát az átmeneten keresztül

$I_s \exp \frac{eU}{kT}$ adja meg a p oldalon a lyukak, n oldalon az elektronok diffúzióját a nyitófeszültséggel csökkentett potenciálgyáttal szemben

I_{foto} egyenesen arányos a megvilágítás erősségével

U_{foto} logaritmikusan függ a megvilágítás erősségétől

[9]



11. ábra: Napelem egy munkapontjához (pirossal jelzett terület), és maximális értékhez (zöld színnel feltüntetett terület) tartozó áram-feszültség karakterisztika

Sötétáram csökkentésével a hatásfok növelhető. Ezt nagyobb tiltott sáv alkalmazásával lehet csökkenteni, így termikus gerjesztés kevesebb töltéshordozót képes generálni, tehát I_s kisebb lesz és az üresjárási feszültség növelhető.

3.7 Kitöltési tényező (Fill Factor, FF)

A napelemből kivehető maximális teljesítmény osztva az adott megvilágítási értékhez tartozó üresjárási feszültség és a rövidzárási áram szorzatával (ez elméletileg elérhető kitöltési tényező, mivel ha a rövidzárási áram folyik, akkor az üresjárási feszültség zérus és ez igaz fordítva is). Megadja az adott megvilágításnál a napelem munkapontjához tartozó terület és a napelem maximális teljesítményéhez tartozó munkapont terület hányadosak értékét (11. ábra).

$$\varphi = FF = \frac{U_m I_m}{U_0 I_L}$$

A kitöltési tényezőt meglehetősen empirikus közelítéssel is:

$$\varphi = FF = \frac{U_{\text{ü}} - \ln(U_{\text{ü}} \times 0,75)}{U_{\text{ü}} + 1} \quad [10]$$

Ha százalékos formában szeretnénk megadni, akkor csak meg kell szorozni százzal.

Általában ez az érték 0,75-0,85 körüli tartományba esik, de jelentősen függ a kitöltési tényező maximuma a félvezető anyagától is. Például GaAs esetén a kitöltési tényező értéke lehet 0,89 [10].

3.8 Napelem hatásfoka

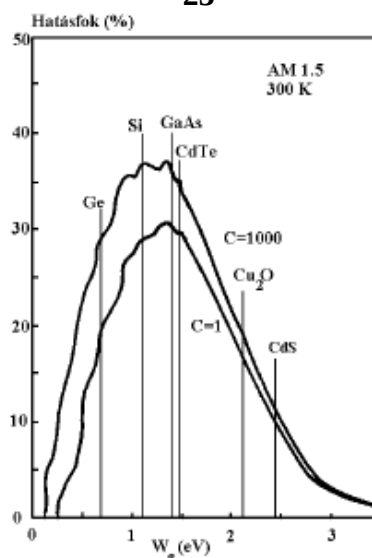
$$P = I \times U = I_{\text{foto}} \times U - I_s \times U(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

A napelemből maximálisan kivehető teljesítmény $P_m = U_m I_m$, fontos a megfelelő terhelés megválasztása. A napelem hatásfokát a kivehető elektromos teljesítmény és a beeső fénytelsítmény hányadosa határozza meg.

$$\eta = \frac{U_m I_m}{P_{\text{foto}}} = \frac{\varphi U_{\text{ü}} I_r}{P_{\text{foto}}}$$

A hatásfokot befolyásolják a félvezető tulajdonságai, például a tiltott sáv nagysága. Növekvő tiltott sáv esetén a fotoáram csökken, mivel kevesebb foton képes a tilos sávot átugrani ezáltal kevesebb töltéshordozót tud a fény generálni (13. ábra). A fotoáram csökkenése mellett az üresjárási feszültség növekedés figyelhető meg. Növekvő tiltott sáv esetén viszont az üresjárási feszültség kezd el növekedni (14. ábra). A legnagyobb elméleti hatásfokot akkor kapjuk, ha az üresjárási feszültség és a rövidzárási áram szorzata maximum.

Ezért a különböző anyagú félvezetőknek a tilossáv függvényében meg lehet rajzolni a félvezetőkhez tartozó elméleti (ideális) hatásfokokat.(12. ábra)



12. ábra: A különböző anyagú napelem cellákkal elérhető ideális hatásfokok értékei meghatározott energiájú tiltott sávok esetén (AM1,5 besugárzás mellett és erősen koncentrált fény esetén)

A hatásfok függ:

- a beeső fény intenzitásától (növelhető fénykoncentráció elemek segítségével)
- a beeső fény spektrumától (javítható a tandem cella kialakítás segítségével)
- a napelem cella hőmérsékletétől (hátoldali hűtőbordával csökkenthető)
- optikai tulajdonságoktól (javíthatóak az alábbi eljárások segítségével: oxidált felületet fekete sötétibolya színből készítve, felület érdességének megváltoztatása sima felületről tetraéderezsre vagy „PEARL” fordított tetraéderezs kialakítás segítségével lehet a visszaverődés csökkenteni, felületen lévő kivezetések árnyékoló hatásának csökkentése)[2]

A Földi alkalmazás során a hatásfok mérése általában AM1,5 feltétel mellett, és a napelem cella 25°C-os hőmérséklete esetén mérik [2].

3.9 Rövidzárási áram

Rövidzárási áram akkor lép fel, ha az üresjárási feszültség nulla, ideális napelem cellának az tekinthető, ahol a rövidzárási áram értéke és a fotoáram értéke egyenlő. A rövidzárási áram értékét befolyásoló tényezők:

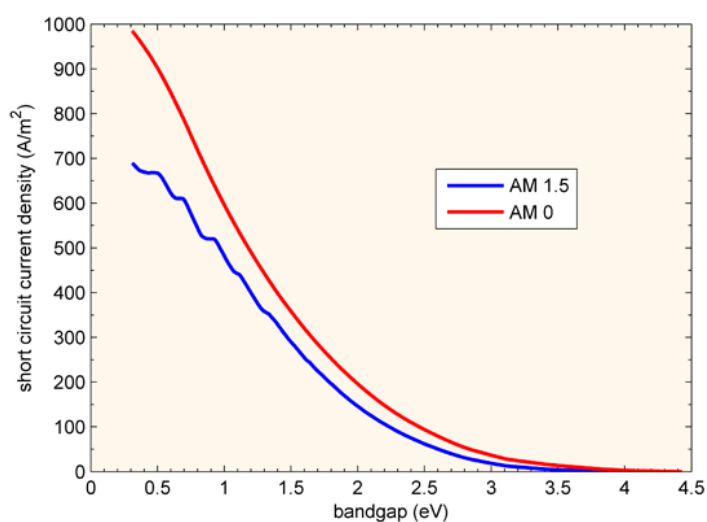
- napelem cella hasznos területe
- a félvezetőre jellemző tiltott sáv nagysága
- fotonok darabszáma (megfelelő energiával rendelkező fotonok)
- a beeső fény spektruma
- az eszköz optikai tulajdonsága (reflexió, transzmisszió, abszorpció)
- napelem modulok celláinak kapcsolata (soros-párhuzamosan kapcsolódnak a cellák egymáshoz)

A vizsgált félvezetők esetén fontos paraméter a rövidzárási áram esetén a diffúziós hossz és a felület passziváltsága.

$$I_r = qG(L_p L_n)$$

Ahol a G a generációs ráta, az L_p és L_n a kisebbségi töltéshordozók diffúziós úthossza.

A rövidzárási áram AM1,5-mérési körülmények között, szilícium cella esetén, laboratóriumban $46 \frac{mA}{cm^2}$ érték el maximálisan, a kereskedelemben kapható napelem cellák esetén ez az érték $18 \frac{mA}{cm^2} - 35 \frac{mA}{cm^2}$ [11].



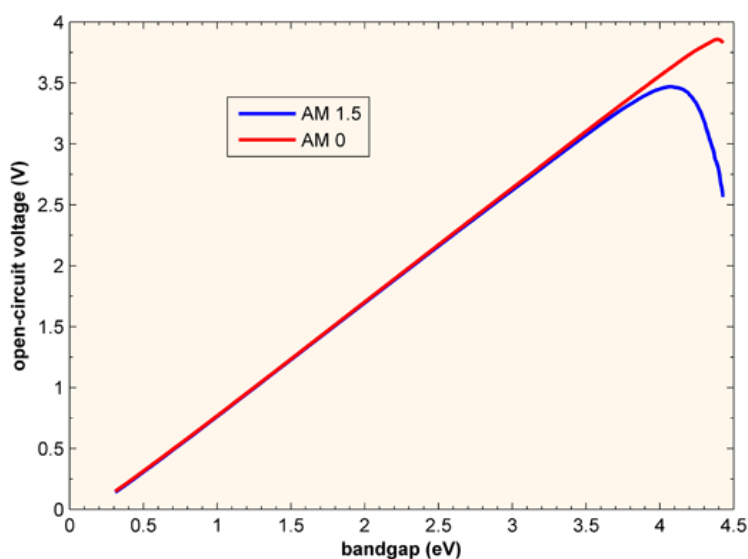
13. ábra: A napelem cella rövidzárási áramértékének alakulása a tiltott energiasáv függvényében AM0-ás és AM1,5-es feltételek mellett

3.10 Üresjárási feszültség

Az üresjárási feszültség az a legnagyobb feszültségérték, ami elérhető a napelem cellánál, ha az áram értéke nulla. A nagytisztaságú szilícium alapú napelem cella üresjárási feszültsége nem haladja meg a 760mV-ot, míg a kereskedelembe kapható esetében ez az érték 600mV nagyságrendben helyezkedik el [12].

$$U_{\text{ü}} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(N_A + \Delta n)\Delta n}{n_i^2} \right]$$

Ahol N_A a szennyezés mértéke (donor-, amikor a szilícium atomhoz 5 vegyérték elektronnal rendelkező atommal hozzuk kovalens kötésbe, illetve akceptor- amikor három vegyértékű atommal hozzuk kötésbe), Δn a többségi töltéshordozók koncentrációjának megváltozása, n_i belső töltéshordozók.



14. ábra: A napelem cella üresjárási feszültségének változása a tiltott energiasávok megváltozásának függvényében AM0-ás és AM1,5-es feltételek mellett

A diagramon lehet látni, hogy növekvő tiltott sávhoz növekvő üresjárási feszültség tartozik.

4. Mérés

4.1 Mérési eszközök ismertetése

A mérés az Óbudai Egyetem Villamosenergetikai Intézet Spektrális Sugárzó Laboratóriumában végeztem el az egyetem B-épületében.

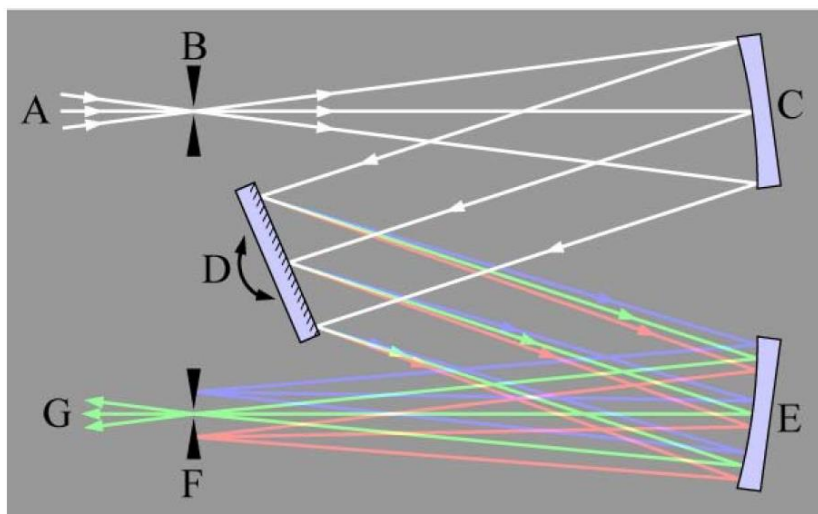
A mérés során a következő berendezéseket vettem igénybe.

<i>Eszköz megnevezés</i>	<i>Típusa</i>
Napelem cella	Steca TA-SE1
Monokromátor	DK-240
Fényforrás (Xenon)	ASB-XE-175W
Számítógép program	LabVIEW SpectraWiz
Digitális Multiméter	FLUKE 867B
Spektrométer	BLUE-Wave

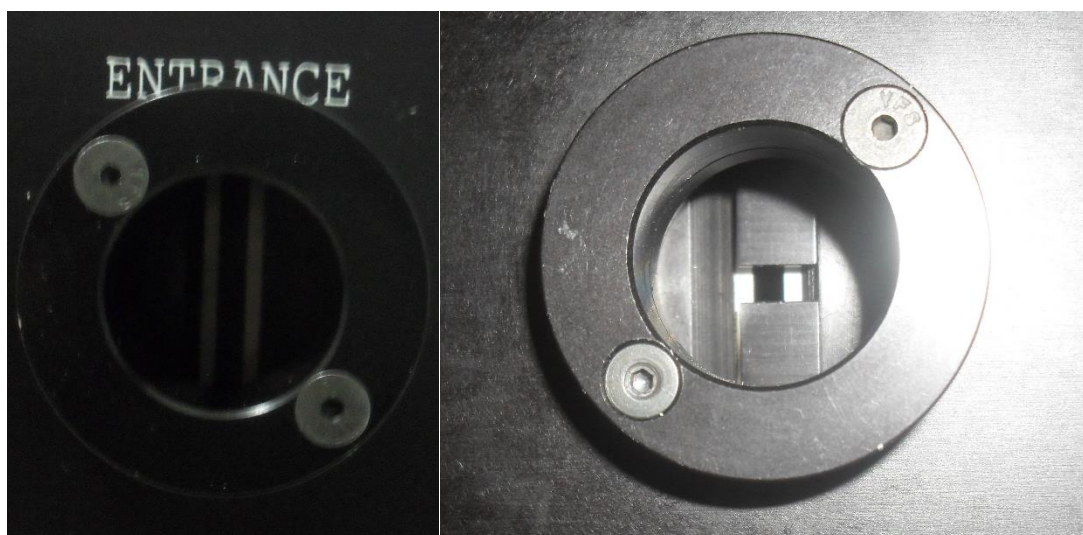
5.táblázat: Méréshez használt berendezések megnevezése és típusa

Monokromátor: A monokromátor egy DK-240 (Czerny-Turner) típusú műszer volt, aminek a feladata az, hogy a fényforrásból kilépő fényt jól definiált hullámhosszokra bontsa fel és ebből csak a meghatározott hullámhosszú fényt bocsássa ki a detektorra. Mint a neve is tükrözi (monokromátor=egy szín). Működése a 15. ábra segítségével érthető meg. A belépő fény a (15. ábra B slit1) résen keresztül jut a berendezésbe. A rés szélessége $10\mu\text{m} - 3000\mu\text{m}$ közötti értékre állítható be [13]. A résen átmenő fény egy homorú tükörre esik (15. ábra C, E), amely a fókuszált fényt az optikai rácusra (fényfelbontó elemre) vetíti. A belépő koncentrált fényt a homorú tükör párhuzamosítja. Az optikai rácspan 1 mm-en 1200 karcolás található, amiből az optikai rács minőségére és felbontóképességére lehet következtetni [13]. Ez az érték befolyásolja a monokromátor pontosságát. A monokromátorból kilépő fény hullámhossz pontossága, amely a detektorra esett, a beállított érték $\pm 0,3\text{nm}$ -es pontossággal jelent meg [13]. Az optikai rácspot egy igen pontos léptetőmotor forgatja annak érdekében, hogy csak a kívánt hullámhosszú fény jelenjen meg a kimeneti résen (15. ábra F slit2). Az F (slit2) rés nagyságát

szintén $10\mu\text{m} - 3000\mu\text{m}$ között lehet állítani [13]. Minél nagyobb a rés szélessége, annál nagyobb a detektorra eső fényenergia.



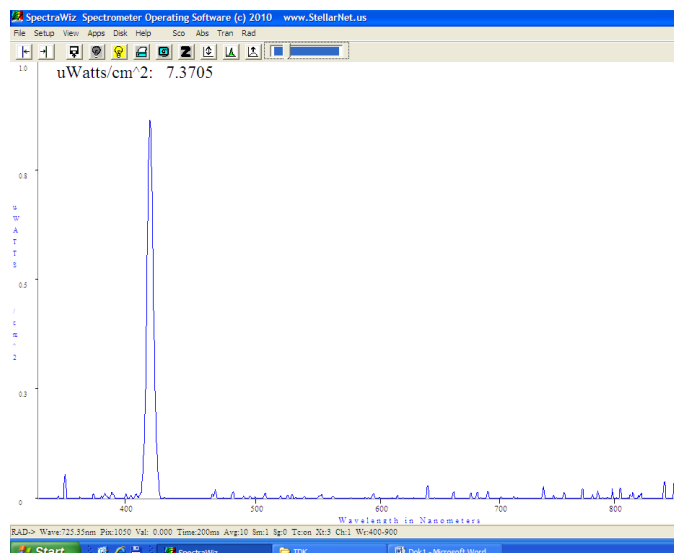
15. ábra: DK-240 (Czerny-Turner) monokromátor kialakítása



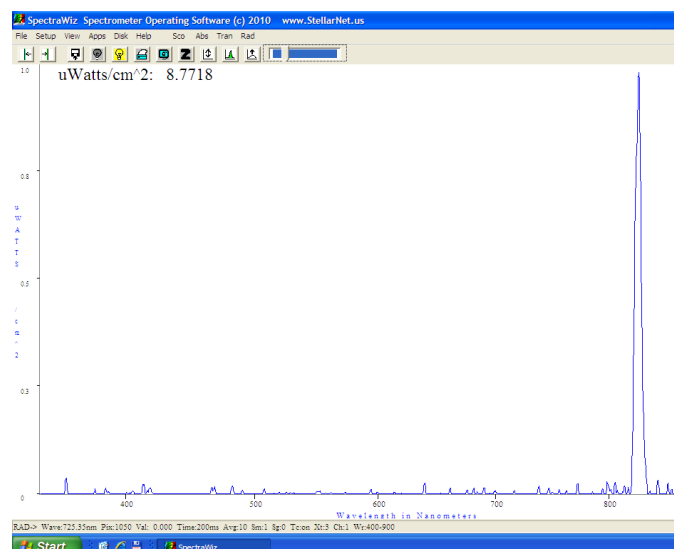
16. ábra: Monokromátor belépő illetve kilépő részének képe $3000\mu\text{m}$ résszélesség esetén

A monokromátor kimenetén megjelenő fénysugár spektrumát több alkalommal is lefényképeztem spektrométer segítségével, ellenőrzés céljából. Az alábbi ábrákon (17.-18. ábra) a monokromátor gyári szoftvere segítségével a beállított hullámhossz érték $42000\text{\AA}$ volt (17. ábra) az első esetben, ami ibolyaszínű fényt jelent. A második esetben a beállított hullámhossz érték $84000\text{\AA}$ volt (18. ábra) ami már az infravörös sugárzási tartomány része. A lefényképezett spektrum képek segítségével látható, hogy a monokromátor kimenetén igen nagy pontossággal a szoftveresen beállított hullámhossz érték jelent meg illetve esett a napelem cellára, keskeny sáv szélesség mellett.

Vagyis a monokromátor a beállított hullámhossz értéket jeleníti meg a kimeneten nagy intenzitással, a többi hullámhossz csekély mértékben vagy egyáltalán nincs jelen a spektrumképben.



17. ábra: Spektrométer segítségével lefényképezett monokromátor kimenetén megjelenő spektrumkép szoftveresen beállított 420nm-er esetén (ibolyaszínű fény)



18. ábra: Spektrométer segítségével lefényképezett monokromátor kimenetén megjelenő spektrumkép szoftveresen beállított 840nm-er esetén (infravörös sugárzás)

Spektrométer: A spektrométer az UV sugárzási tartományon keresztül az emberi szem számára látható fénysugárzáson át az infravörös sugárzási tartományig (200nm-1150nm) képes volt a

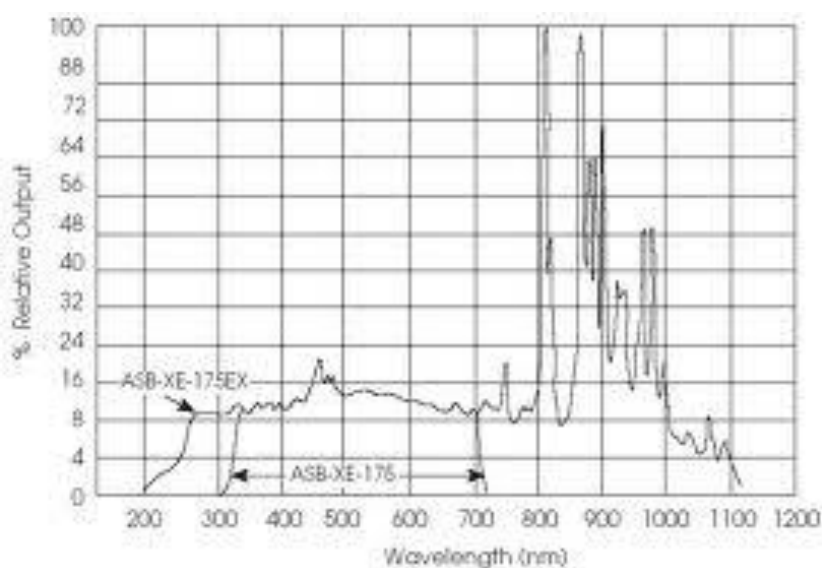
különböző hullámhosszú fénysugarak intenzitását illetve spektrumképét megmérni és rögzíteni [14].

USB interfészen keresztül csatlakozott a számítógéphez, ahol is a SpectraWiz [14] nevű szoftver segítségével lehetett a spektrumképeket grafikusan megjeleníteni. A mérő fejhez optikai kábellel lehetett csatlakoztatni a spektrométert.



19. ábra: Monokromátor kimenetére rögzített spektrométer mérőfej

Fényforrás: A fényforrás egy ASB-XE-175W típusú xenonlámpa volt. A xenonlámpára jellemző adatok az alábbiak voltak, 175 wattos, színhőmérséklete 5600K [15], amely nagyon hasonló a Nap színhőmérsékletére, ami körülbelül 5900K (hideg fehér fény). A lámpával szemben támasztott követelmény az volt, hogy egy nagy spektrális eloszlású fényforrás legyen, ami hasonlít a Nap széles spektrumára. (ún. napszimulátor) A mérés az alkalmazott xenonlámpa spektrumából kiindulva 300nm-től egészen 1100nm-ig történhetett volna.



20. ábra. Az alkalmazott Xenonlámpa (ASB-XE-175W) spektruma

Napelem cella (Steca TA-SE1): Az alkalmazott napelem, egy monokristályos szilícium alapú cella, amely egy UV és vízálló átlátszó műanyag fedéllel volt ellátva. Ezt a típusú napelem cellát a gyakorlatban szenzorként alkalmazzák, amely képes a besugárzott fény nagyságától függően meghatározott áram értéknél kapcsolni egy áramkört (besugárzási határérték kapcsoló) vagy a besugárzási intenzitás nagyságát képes mérni. A napelem cella segítségével lehet egy napkollektoros rendszer keringtető vízpumpáját be illetve ki kapcsolni a besugárzott fény intenzitásának függvényében. A napelem cellához egy kéteres UV-álló vezeték volt csatlakoztatva, a cella felülete $4,5 \text{ cm}^2$ volt [16].



21. ábra: Mért napelem cella (Steca TA-SE1)

Multiméter (FLUE 867B): A rövidzárási áramot egy digitális multiméter segítségével mértem, aminek a mérési tartománya egyenáram esetén $300\mu\text{A}$ -10A-ig terjed, $\pm 0,05\%$ -os pontság mellett [17].



22. ábra: Mérés során alkalmazott multiméter (FLUKE 867B)

4.2 A mérési elrendezés, mérés leírása

A mérési összeállításnak kellett biztosítani azokat a feltételeket, hogy a vizsgált napelemre egyszerre csak egy jól meghatározott hullámhosszú fénysugár érkezzon és meghatározható legyen a hullámhosszakhoz tartozó rövidzárási áramérték, reprodukálható módon. Ehhez egy olyan mérési összeállításra volt szükségem, amely során a fényforrásból érkező hideg fehérfény spektrumából egy szerkezet „kiragadjon” egy meghatározott hullámhosszat és a napelemre csak az a jól definiált hullámhossz érkezzon. Ez a szerkezet a monokromátor volt.

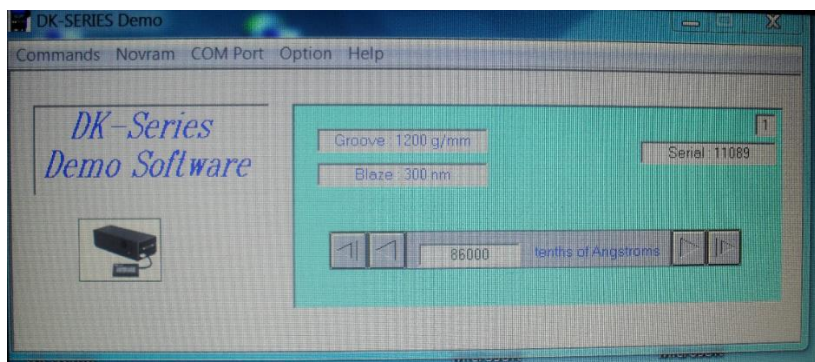
A mérési elrendezést a 23. ábra mutatja. A mérőasztalon az elhelyezett laboratóriumi eszközök a hozzájuk tartozó leírás szerint voltak elrendezve. A fényforrás közvetlenül csatlakozott a monokromátor bemenetére (slit1), így a xenonlámpából kijutó fény, törés, elnyelődés, szóródás nélkül a monokromátorba jut. A fényforrás fényintenzitását maximumra állítottam, ami azt jelenti, hogy a fényforrás belsejében lévő szűrők ki voltak iktatva, így a lámpából közvetlenül kilépő fényt vetíti a monokromátor belsejébe. A monokromátor kimeneti részére (slit2) stabilan csatlakoztattam a napelem cellát, ami egy mechanikai védelmet nyújtó átlátszó műanyag plexi mögött volt elhelyezve. A napelem cella kivezetéseit a mérés céljából a multiméterrel kötöttem össze. A digitális multiméter méréshatárát mA-re állítottam, így annak belső ellenállása 1Ω lett [17]. A monokromátor a mérés során egy számítógéphez soros porton keresztül csatlakozott.



23. ábra: Mérési elrendezés

(1.multiméter, 2. napelem cella, 3. monokromátor, 4. xenonlámpa)

A monokromátor vezérlését egy LabVIEW program segítségével végeztem (24. ábra). (A szoftvert nem én fejlesztettem.) Így szoftveresen lehetett az optikai rács léptetőmotorját mozgatni. Ezáltal csak a szoftveresen beállított fényhullámhossz tudott kilépni a monokromátorból. Ebben az elrendezésben a detektorra jól definiált hullámhosszú fény jutott, ami által a mérést igen nagy hullámhossz pontossággal, a beállított hullámhosszokon lehetett elvégezni. A program segítségével be lehetett állítani a monokromátor be- illetve kilépő résnagyságát is. Ez az érték a mérés során a monokromátor lehető legnagyobb résnagyságára $3000\mu\text{m}$ -re volt állítva mind a két résnél. A kívánt hullámhosszt tized Ångström pontossággal lehetett kiválasztani, a résszélességet pedig μm pontossággal. A program Commands, SETUP menüjében lehetett az értékeket bevinni mind a rés szélesség állítása, mind a hullámhossz megváltoztatásának céljából.



24. ábra. A gyári LabVIEW program képernyőképének egy részlete.

4.3 A mérési környezeti feltételek

A mérés feltételeit feljegyeztem annak érdekében, hogy a mérés a későbbiek során reprodukálható legyen. A mérés egy ablaktalan laboratóriumi szobában, sötétben zajlott azért, hogy szórt fények ne befolyásolják a napelem cella rövidzárási áramának megváltozását. A fényforrás kezdetekkor beállított intenzitása mellett zajlott le a teljes mérés, azaz a besugárzó lámpa teljesítményét nem változtattam. A napaelem cella felületére eső fénysugárzás a mérés során végig 90 fokot zárt be, a cella a mérés során nem lett elmozdítva, helyzete fix volt.

A további környezeti feltételeket a 6. Táblázat tartalmazza.

<i>Hőmérséklet</i>	<i>Páratartalom</i>	<i>Légköri nyomás</i>
27°C	65%	101kPa

6.táblázat: mérés külső feltételei

5. Mérési eredmények

A mérést a látható és infravörös sugárzástartományban végeztem hullámhosszakban kifejezve 380nm-840nm közötti tartományt jelent. A 7. táblázat első oszlopa mutatja a vizsgált hullámhosszakot, ami 380nm-től 20nm-enkénti lépésben halad 840nm-ig. A mérés során a legnagyobb áramértékeknél kisebb hullámhosszlépéseket alkalmaztam annak érdekében, hogy a napelem leadott maximális rövidzárási áramát és a hozzá tartozó hullámhosszakot minél pontosabban meg lehessen határozni. A táblázat második, harmadik és negyedik oszlopa a beállított hullámhossz értékekhez tartozó mért rövidzárási áramokat tartalmazza, azonos xenonlámpa intenzitás és változatlan külső paraméterek mellett. A mérést háromszor végeztem el annak érdekében, hogy az artifaktumok, vagy véletlen hibák kiszűrhetőek legyenek. A mérés során a kezdetekkor beállított feltételek mellett mértem, a napelemet nem mozgattam a mérés során. Sem a külső hőmérséklet, sem a környezeti fényviszonyok nem változtak annak érdekében, hogy a mérés következetes és reprodukálható legyen. A táblázat ötödik oszlopa a három mérés során mért rövidzárási áramok értékéből számolt átlagát mutatja. A hatodik oszlop a három mért rövidzárási áram értékének az empirikus szórását adja meg az alábbi képlet segítségével.

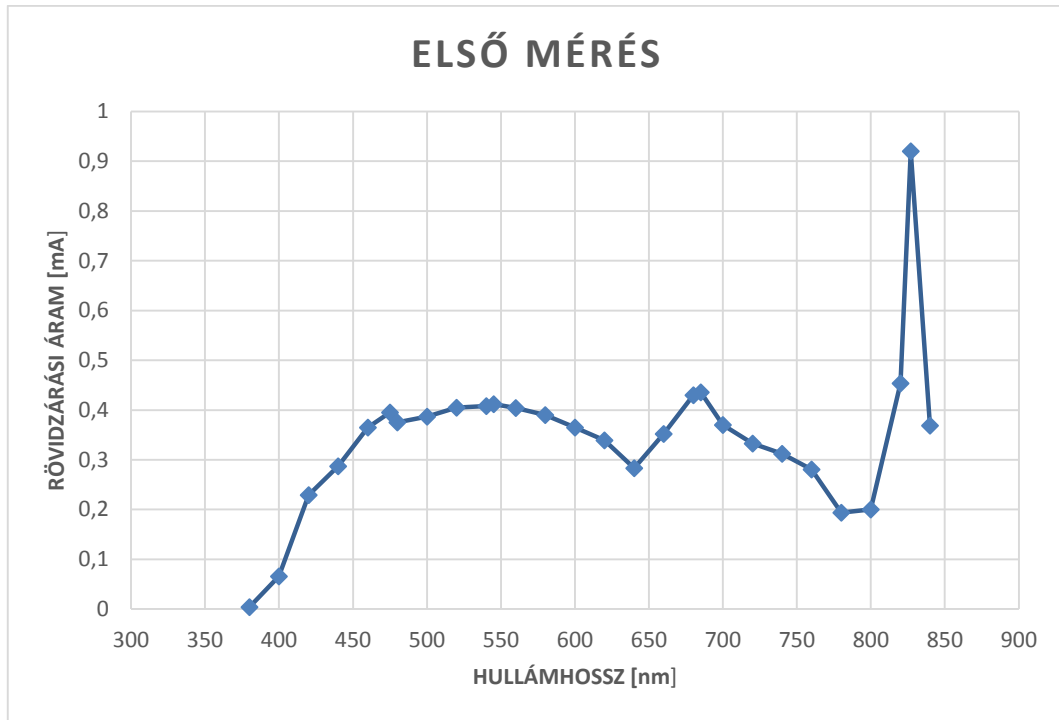
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ahol n az elemek darabszáma, x_i a mért mennyiség, $\bar{x}$ pedig a mért eredmények átlaga.

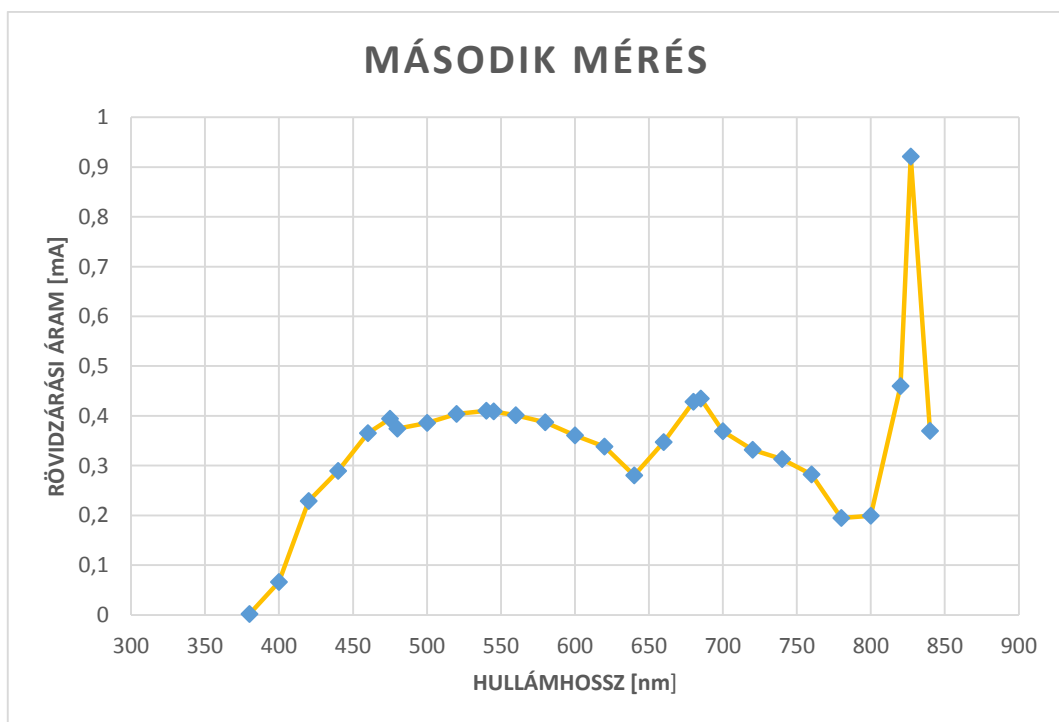
Beállított hullámhosszak [nm]	Első mérés: A beállított hullámhosszaknál mért rövidzárási áramok [mA]	Második mérés: A beállított hullámhosszaknál mért rövidzárási áramok [mA]	Harmadik mérés: A beállított hullámhosszaknál mért rövidzárási áramok [mA]	A három mérés alapján a mért rövidzárási áramamokból számított átlag [mA]	A három mérés során mért rövidzárási áramok eredményéből számított empirikus szórás
380	0,004	0,002	0,003	0,003	0,001
400	0,066	0,066	0,064	0,065	0,001
420	0,229	0,229	0,225	0,228	0,002
440	0,287	0,289	0,283	0,286	0,003
460	0,365	0,365	0,361	0,364	0,002
475	0,395	0,394	0,392	0,394	0,002
480	0,375	0,374	0,368	0,372	0,004
500	0,387	0,386	0,38	0,384	0,004
520	0,405	0,404	0,398	0,402	0,004
540	0,408	0,41	0,406	0,408	0,002
545	0,412	0,409	0,409	0,410	0,002
560	0,404	0,401	0,398	0,401	0,003
580	0,39	0,387	0,385	0,387	0,003
600	0,365	0,361	0,358	0,361	0,004
620	0,339	0,338	0,334	0,337	0,003
640	0,283	0,28	0,275	0,279	0,004
660	0,352	0,347	0,343	0,347	0,005
680	0,43	0,428	0,422	0,427	0,004
685	0,436	0,435	0,431	0,434	0,003
700	0,37	0,369	0,365	0,368	0,003
720	0,333	0,332	0,328	0,331	0,003
740	0,312	0,313	0,309	0,311	0,002
760	0,281	0,282	0,279	0,281	0,002
780	0,194	0,195	0,193	0,194	0,001
800	0,2	0,199	0,199	0,199	0,001
820	0,454	0,46	0,455	0,456	0,003
827	0,92	0,921	0,914	0,918	0,004
840	0,369	0,37	0,364	0,368	0,003

7.táblázat: A mérési eredmények táblázatos formába rendezve

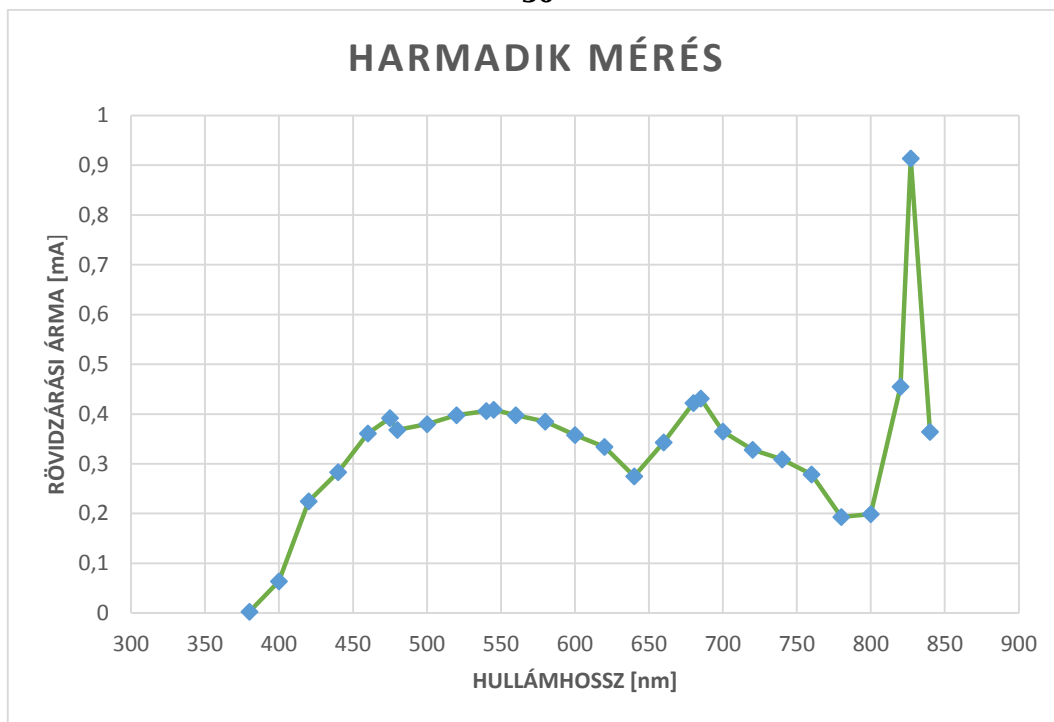
Az alábbi diagramok mutatják a mért rövidzárási áramok (mA) eloszlását a hullámhosszak függvényében (nm), a három mérés során kapott értékek alapján.



1. diagram: Első mérés alapján ábrázolt mért rövidzárási áramok a beállított hullámhosszak függvényében



2. diagram: Második mérés alapján ábrázolt mért rövidzárási áramok a beállított hullámhosszak függvényében



3. diagram: Harmadik mérés alapján ábrázolt mért rövidzárási áramok a beállított hullámhosszak függvényében

A mért adatokból, mind táblázatos, mind grafikus alakulásából is látható az értékek szinte nulla fluktuációja alapján a mérés igen reprodukív volt. A mérés hibája elenyésző.

5.1 A mérés körülményeiről

- A következtetések levonásakor figyelembe kell venni, hogy a napelem cella hatásfoka nagyobb, mint a moduloké, vagyis a napelem cella mért rövidzárási árama nagyobb lehet, mint a több napelem cella soros, vagy párhuzamosított kivitelében.
- A mérések nem STC (Standard Test Conditions) laboratóriumi körülmények között történtek. Vagyis a megvilágítás nem $E=1000 \frac{W}{m^2}$, $T=25^\circ C$ cellahőmérséklet, $AM=1.5$ értékek mellett. [18]
- A mérés xenonlámpa besugárzásával történt, vagyis a Nap spektrumától eltérő fényforrással. Ezért a mérés adataiból, nem vonhatóak le olyan következtetések, amelyek teljes egészében érvényesek lennének a Nap spektrumával vizsgált napelemre.

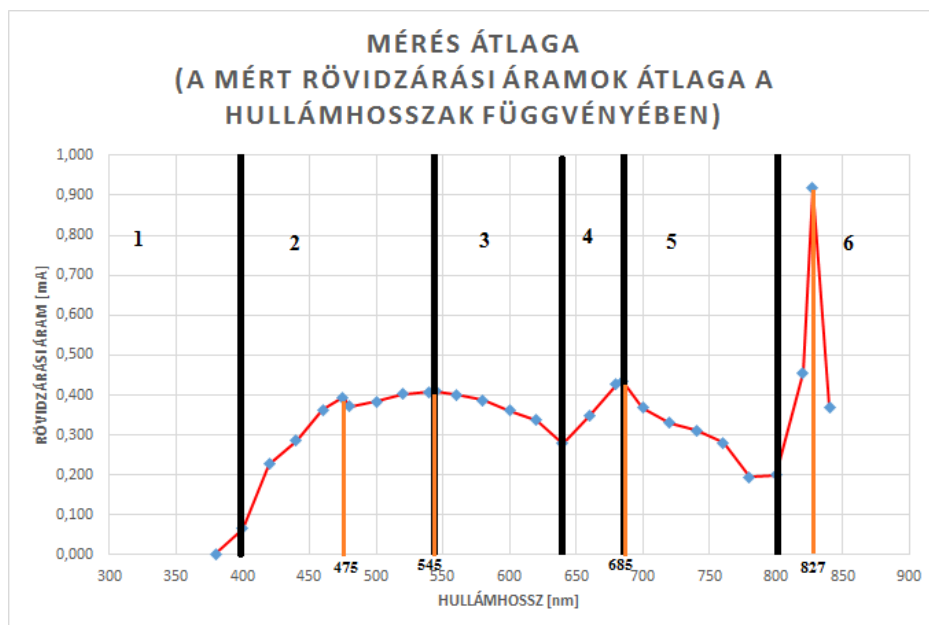
- A mérés 400nm-800nm-ig viszonylag egyenletes a kibocsátott fény intenzitás mértéke, 800nm fölött az alkalmazott xenonlámpának a spektrumában nagy fény intenzitás kiugrások találhatók, amik a mérés eredményeit befolyásolhatták.

A xenonlámpa spektrumából következik, hogy a mérés sajnos nem lehetett kizárólag a hullámhosszak megváltozására alapozni, mert az egyes hullámhosszak különböző intenzitással voltak jelen a spektrumban, amik befolyásolták a rövidzárási áram érték nagyságát. A mérési eredményeket ezért nem kizárólag a hullámhosszváltozások okozták, hanem azok intenzitás változásai is. A különböző intenzitásokat a xenonlámpa spektrumából tudhatjuk meg, amit a 20. ábra mutat. A mérésem elsődleges szempontja volt **a rövidzárási áram és hullámhossz megváltozásának a kapcsolatát megvizsgálni, és esetleges ettől eltérő esetben magyarázatot adni a rövidzárási áramban bekövetkezett változásokra is.**

6. Mérés értékelése

A mérés értékelése során a három mérés átlagából felrajzolt árameloszlásának diagramját használtam a hullámhossz függvényében amit az alábbi diagram mutat (4. diagram).

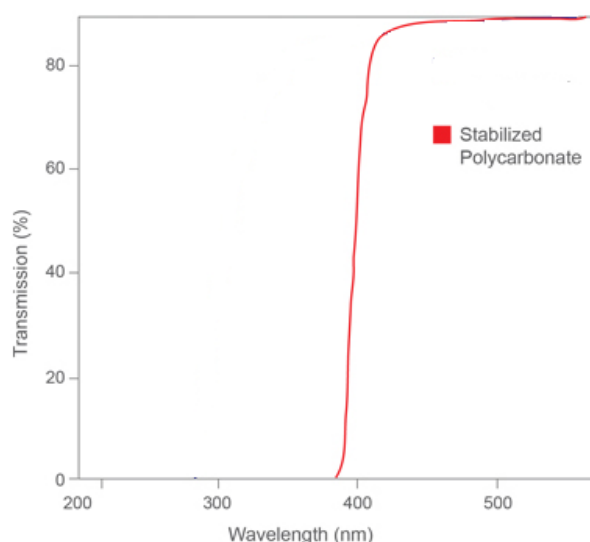
A diagramban fekete vonalakkal (számmal megjelöltem) választottam el az egyes hullámhossztartományokat amiket az értékelés során külön elemeztem. Narancssárga vonalakkal jelöltem az egyes kiugró rövidzárási áram érték nagyságokat.



4. diagram: Három mérés során mért rövidzárási áramok számított átlaga a hullámhosszak függvényében

Az első mérési tartomány amit értékeltem az a 300nm-380nm-ig terjedő hullámhossztartomány amit a 4. diagramon 1-sel jelöltem. Ultraibolya hullámhossz tartományban (300-380nm-en) a foton energiája igen nagyok 3 eV-nál nagyobb értékűek, ami a szilícium kristály tiltott sávjának átugrásához szükséges energia érték (1,12eV) többszöröse, vagyis a foton önmagában képes lenne a generáció képzésre. Mégis az áramérték gyakorlatilag nulla. Ez ellentmondásnak tűnik. A válasz a foton kis hullámhosszával adható meg, mivel az ultraibolya tartományt maga az üveg is megszűri, alsóbb 200nm hullámhossznál a levegő is abszorbeálja.

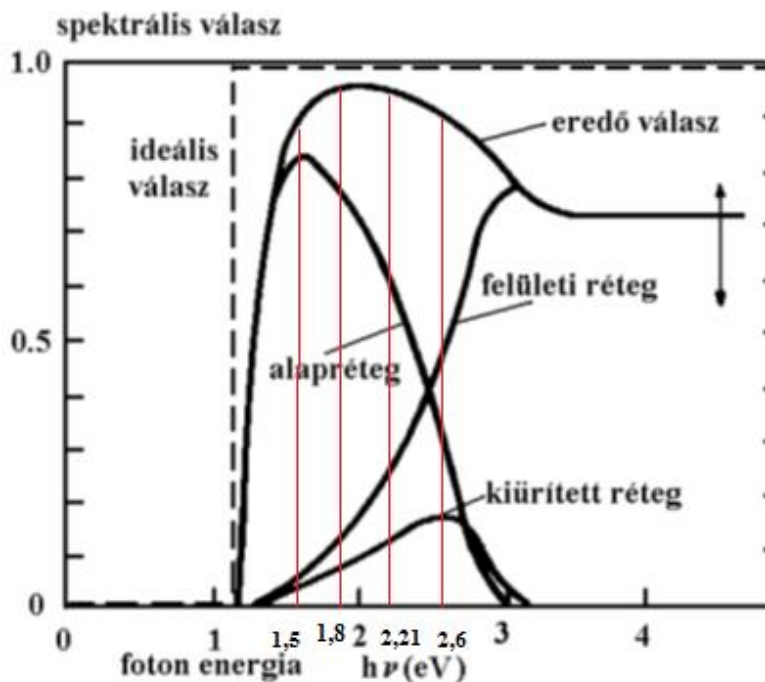
(Üveget azért használnak a napelem felületeknél mivel a kristályos szerkezetű szilícium törékeny, és ezért mechanikai védelmet kell biztosítani, és ellenállóvá kell tenni az időjárás okozta víz hatásától is.) A mérés során 380 nm-nél kisebb hullámhosszú foton nem tudott bejutni a félvezető tömbi anyagába és ott nem tudta átadni energiáját az elektronnak, hogy az a vezetési sávba kerüljön. Az UV foton a felületen abszorbeálódott ezért generáció-keltésre sem volt képes. A foton elnyelés nemcsak az üvegre jellemző, hanem a mérés során alkalmazott napelem cella műanyag burkolatára is. Vagyis képes volt elnyelni az ultraibolya sugárzási tartományban lévő fotonokat a cella átlátszó borítása. A 25. ábra a műanyagra jellemző foton transzmisszió (áteresztő képesség) százalékos értékét mutatja a hullámhossz függvényében. Ezen az ábrán jól kirajzolódik, hogy 380nm alatti fotonokat a műanyag abszorbeálja vagyis nagyobb hullámhosszak felől nézve a transzmisszió nagymértékben lecsökken, ezáltal a napelem cella előtt a fotonok elnyelődnek, nem tudnak eljutni a napelem cella felületéig.



25. ábra: Műanyagra jellemző transzmisszió százalékos értékben, a hullámhossz függvényében

A második mérési tartomány 400nm-től 545nm-ig hullámhossz tartományig terjed ezt az intervallumot a 4. diagramon 2-sel jelöltem. A hullámhossz skálán felfele haladva az tapasztalható, hogy a rövidzárási áram a besugárzott fény intenzitásának megváltoztatása nélkül meredeken elkezd nőni. Vagyis a napelem cella rövidzárási árama megnövekedett a hullámhossz megnövelésével. 400nm-545nm-ig a foton energiája még igen nagy, így a tiltott sáv energiájához képest nagyobb energiát tudnak az elektronoknak átadni, vagyis a fotonok generációkra képesek a félvezető anyagán belül. Viszont a hullámhosszuk már elég nagyok ahhoz, hogy képesek legyenek behatolni a félvezető anyagába, bár a diffúz út még hosszú, ezért 3eV és 2,5eV foton energiák között inkább a napelem cella felsőbb rétegeiben nyelődnek el (26. ábra), és ott adják át az elektronoknak az energiájukat, hogy azok a vezetési sávba tudjanak jutni.

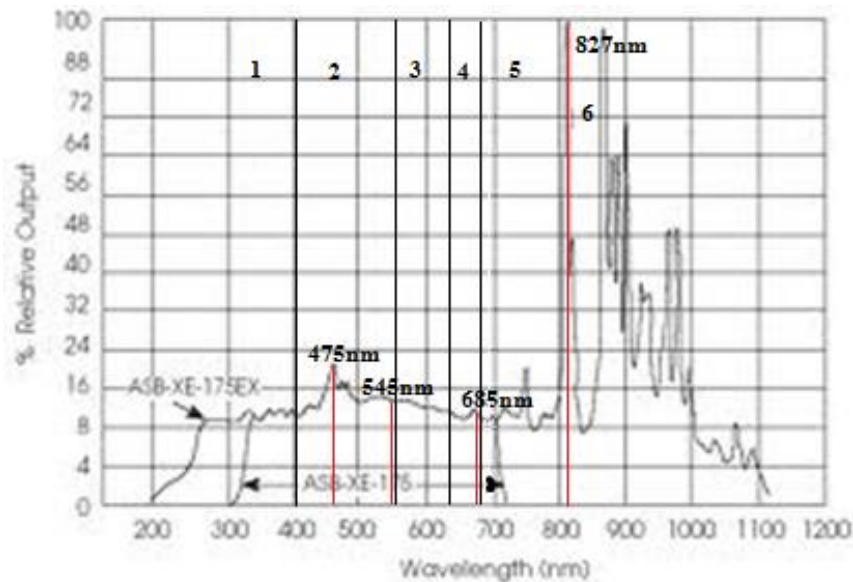
E hullámhossz tartományba bekövetkező rövidzárási áram megnövekedés két effektussal magyarázható. Az egyik, hogy ebben a vizsgált hullámhossz-tartományban vagy foton energia tartományban (3eV-2,21eV) a napelem spektrális válasza nagymértékben javul (lásd 26. ábra).



26. ábra: Szilícium atomra jellemző spektrális válasz alakulása a foton energiák függvényében

A spektrális válasz megadja a napelemre érkező fény hullámhosszától vagy foton energiától függően a napelem által adott villamos válasz nagyságát, vagyis a meghatározott hullámhosszakhoz tartozó fotonok elektrongeneráló képességét.

A másik effektus, ami a rövidzárási áram ilyen mértékű növekedését okozta a xenonlámpa spektrumából (27. ábra) következik. A vizsgált tartományban (400nm-545nm) a növekvő hullámhosszhoz növekvő intenzitás párosul, ami szintén hatással volt a mért rövidzárási áram ilyenfajta megnövekedésében.



27. ábra: Xenonlámpa spektruma fekete vonallal elválasztva és számmal megjelölve az egyes értékelési tartományok, illetve piros vonallal a fontosabb hullámhosszak intenzitás nagyságának megjelölése

400nm és 545nm-es hullámhossz-tartományban két hullámhossz értéknél mértem rövidzárási áram maximumot. A xenonlámpa spektrumát megvizsgálva arra lehet következtetni, hogy 475nm-en volt a legnagyobb mért rövidzárási áram, mivel ehhez a hullámhosszhoz nagy intenzitásbeli kiugrás tartozik. A mérés alapján a 2. vizsgált tartományon belül 545nm-en mértem a legnagyobb rövidzárási áramot, ami a három mérés alapján számolt átlagos értéke 0,41mA nagyságú, míg 475nm-hez átlagosan 0,394mA mért rövidzárási áramérték tartozik. Annak ellenére, hogy 545nm-es fénysugár kisebb foton energiával rendelkezik (2,21eV) és kisebb intenzitással van jelen, mint a 475nm-es fény (2,6eV) mégis nagyobb a mért rövidzárási áramérték a nagyobb hullámhossz esetén. A válasz a spektrális válasz függvényből (26. ábra) kapható meg, 2,21eV (545nm) nagyobb a szilícium atomra jellemző válasz nagysága, mint 2,6eV-t foton energiánál (475nm).

Mindezekből egyértelműen látható, hogy a napelem rövidzárási áramának nagysága nem pusztán a fényintenzitástól függ, hanem annak hullámhosszától is.

A tendencia a fényintenzitás megváltozása és a rövidzárási áram között a 4. diagram és 27. ábra mutatja, mindez egy elnyújtott „harang-jellegű görbében” vehető észre mind a fényforrás spektrumában, mind a rövidzárási áram értékében 400nm és 650nm között.

A napelem spektrális válasza alsóbb hullámhossz tartományokban nem megfelelő, akkor a gyártók a cella felső rétegét változtatják meg, annak érdekében, hogy javuljon a napelem válasza a rövid hullámhosszak-tartományában.

A 3. vizsgált tartomány 550nm-640nm-ig terjedő hullámhosszak. E tartományon belül egyenletes csökkenés látható a rövidzárási áram értékben, ebben a hullámhossz tartományban a napelem spektrális válaszanak hasonlóan jónak kéne lenni, mint a zöld tartományban, mégis csökken a mért áram érték nagysága. A magyarázatot a xenonlámpa spektrumából (27. ábra) kapjuk, ami ezeken a hullámhosszokon csökkenő intenzitást mutat. Vagyis a spektrális válasz ugyanolyan jó lehet ebben a tartományban, mint a zöld színű (2. értékelési tartomány) tartományban, csak a megvilágító fényforrás intenzitás csökkenése befolyásolja negatív irányba az áramértéket.

Bár 380-640nm között hasonló tendencia mutatkozik az intenzitás megváltozásában és a rövidzárási áram változásában, de nem az összes jelenség magyarázható ezzel.

660nm-es hullámhossztól felfelé folyamatos emelkedés következik be a rövidzárási áram értékekben annak ellenére, hogy a xenonlámpa spektrumát megfigyelve az intenzitás átlagosan nem mutat növekedést. 685nm-en a rövidzárási áram elér egy maximumot. Ha eltekintünk a legnagyobb mért rövidzárási áramértéktől, amit az infravörös tartományban találhatunk meg, akkor ez az áramérték a legnagyobb.

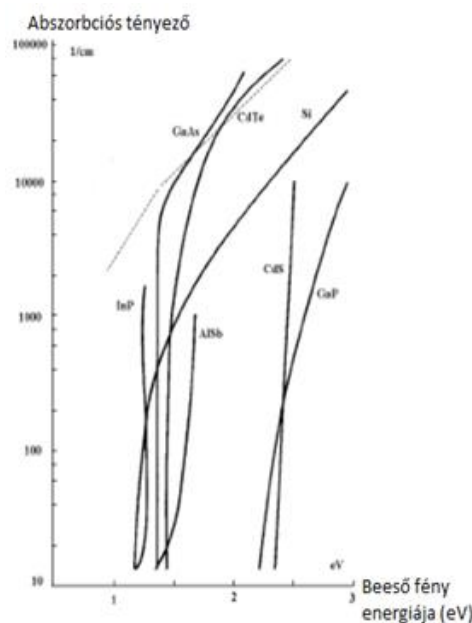
A 27. ábra alapján látható, hogy 475nm-er (2,6eV) és 545nm-er (2,21eV) nagyobb intenzitással van jelen, mint a 685nm-er (1,8eV), mégis a mérések alapján a három hullámhosszhoz kapcsolódó rövidzárási áram értékének legnagyobbja a spektrumban kisebb intenzitással jelen lévő 685nm-en volt, aminek az értéke átlagosan 0,434mA.

Ebből arra lehet következtetni, hogy az adott napelem spektrális válasza itt a legjobb, amit a 26. ábra is alátámaszt. A Si napelem spektrális válasza itt közelíti meg a legjobban az ideális válasz értéket. A foton energiák ezen a hullámhosszon még bőven elegendőek a tiltott sáv átugrásához. A 26. ábra alapján látható, hogy főként az alaprétegben zajlanak le az elektron generációs folyamatok, vagyis ezek a hullámhosszak a félvezető alsóbb rétegéig el tudnak jutni és ott hoznak létre elektron generációt.

„A spektrális válasz különösen a kisebb foton energiák tartományában javul, mert ezek jutnak el a szerkezet mélyebb rétegeibe.”[19]

Ezen hullámhossz-tartományon is megfigyelhető az a fontos tény, hogy a napelem hullámhossz függősége nem csak a spektrumban lévő hullámhossz intenzitásoknak a megváltozásában, illetve a foton energiákban rejlik, hanem az adott anyagra jellemző hullámhosszak elnyelésétől és az adott anyagra jellemző besugárzott fény hullámhosszáinak elektron generáció keltő képességétől is nagymértékben függ!

Az ötödik vizsgált hullámhossz tartomány 700nm-től 800nm terjedt. 700nm felett a rövidzárási áram értékeiben egyenletes csökkenés látszik egészen 800nm-ig. A 4. diagram és 7. Táblázat alapján elmondható, hogy az infravörös sugárzás 780nm-800nm-es hullámhossz tartományánál a rövidzárási áram mért értékeiben helyi minimum figyelhető meg. Ez a csökkenő foton energiák tartományában a szilíciumra jellemző abszorpciós tényező meredek esésével magyarázható (28. ábra). E hullámhossz tartományban a fotonok az anyag mélyebb szerkezetében nyelődnek el (26. ábra), vagyis a spektrális válasz fokozatos romlása ezekben a hullámhossz tartományokban a hátoldali kialakításnak is köszönhető.



28. ábra: Abszorpciós tényező változása a foton energiák függvényében különböző félvezető anyagoknál
(a szaggatott vonal az amorf szilícium elnyelését mutatja)

A Si napelemre jellemző vastag anyagstruktúra illetve a hátoldali kontaktus tükrös felületének kialakítása elősegítheti a hosszabb hullámhosszak nagyobb fokú elnyelődését, ezáltal a rövidzárási áram értékének növekedését. A hátoldali kontaktust általában Lambert-felületként alakítják ki, hogy az a sugárzás, amelyik áthaladt a félvezető anyagszerkezetén, de nem

nyelődött el (transzmissziós veszteség), visszatükröződjön a félvezető tömbi anyagába, és ott nyelődjön el. Ha az infravörös sugárzásban a napelem spektrális válasza nem jó, akkor a hátoldali kontaktus tükröződési felületét változtatják meg a gyártók. Általában alumínium felpárolgatásával valósítják meg a hátsó kontaktust a nagyobb reflexió miatt.

827nm-es besugárzott hullámhosszon a rövidzárási áramban maximum figyelhető meg, ami a három mérés során reprodukív volt, a mérési értékek átlagából 0,918mA-nak adódott. Ez a maximum a xenonlámpa spektrumából következik, mivel ez a hullámhossz nagy intenzitással jelenik meg a xenonlámpa spektrumában, a nagyobb intenzitású spektrum vonalhoz tartozó sugárzás nagyobb áramot kelt a napelemben (4. diagram és 27. ábra). Ezen hullámhosszon is megfigyelhető az adott napelem cella hullámhossz függősége, 827nm a spektrumban 100%-os intenzitással van jelen, míg például 685nm körülbelül 10%-al, mégis 685nm-en a mért rövidzárási áram a fele a 827nm-en mért áramának. Ebből látható, hogy az intenzitás tízszeresére nő, míg rövidzárási áram kétszeresére, vagyis ezen hullámhosszon a spektrális válasz érték nagymértékben csökken, ami a 26. ábrán is megfigyelhető. A spektrális válasz függvényben 685nm-hez (1,8eV) jóval nagyobb válasz érték rendelhető, mint 827nm-hez (1,5eV).

6.1 A mérés hibája (8. Táblázat alapján)

Beállított hullámhossz [nm]	Három mért eredmény relatív hibája (p=0,95)	Három mért eredmény relatív hibája százalékban [%] (p=0,95)	A mért rövidzárási áramértékek átlagából levont valódi értékek ($\bar{x}-\Delta x$) [mA]	A mért rövidzárási áramértékek átlagához hozzáadott valódi értékek ($\bar{x}+\Delta x$) [mA]	Valódi érték (Δx)
380	1,434	143,421	-0,001	0,007	0,004
400	0,076	7,604	0,060	0,070	0,005
420	0,044	4,365	0,218	0,238	0,010
440	0,046	4,591	0,273	0,299	0,013
460	0,027	2,732	0,354	0,374	0,010
475	0,017	1,670	0,387	0,400	0,007
480	0,044	4,375	0,356	0,389	0,016
500	0,042	4,238	0,368	0,401	0,016
520	0,040	4,049	0,386	0,419	0,016
540	0,021	2,109	0,399	0,417	0,009
545	0,018	1,818	0,403	0,417	0,007
560	0,032	3,219	0,388	0,414	0,013
580	0,028	2,796	0,377	0,398	0,011
600	0,042	4,182	0,346	0,376	0,015
620	0,034	3,378	0,326	0,348	0,011
640	0,062	6,225	0,262	0,297	0,017
660	0,056	5,586	0,328	0,367	0,019
680	0,042	4,198	0,409	0,445	0,018
685	0,026	2,623	0,423	0,445	0,011
700	0,031	3,093	0,357	0,379	0,011
720	0,034	3,439	0,320	0,342	0,011
740	0,029	2,877	0,302	0,320	0,009
760	0,023	2,342	0,274	0,287	0,007
780	0,022	2,218	0,190	0,198	0,004
800	0,012	1,246	0,197	0,202	0,002
820	0,030	3,031	0,443	0,470	0,014
827	0,018	1,774	0,902	0,935	0,016
840	0,038	3,762	0,354	0,381	0,014

8. táblázat: Mérési hibák

A táblázat első oszlopa megmutatja a napelemre sugárzott fény hullámhosszokat.

A második oszlop a rövidzárási áram relatív hibának értékét mutatja meg, vagyis a várható értékhez képesti eltérést. A harmadik oszlop a mért rövidzárási áram relatív hibáit adja meg százalékos formában.

Relatív hiba számításnál a laboratóriumi gyakorlatban elterjedt 0,95 valószínűségi értékkel számoltam, három mért eredmény esetén a valószínűségi szint (p) megegyezik a 4,30264 táblázatos értékkel.

A relatív hibát az alábbi képlet segítségével számoltam ki:

$$\delta_x = \frac{45}{\bar{x}} \frac{p \times \sigma_{n-1}}{p}$$

A 8. táblázat negyedik és ötödik oszlopa mutatja meg, hogy a várható érték 95% valószínűséggel ezek az áramértékek között lesznek.

A valódi érték hibája más néven a konfidencia szint fele (Δx), a számolása az alábbi képlet segítségével történt:

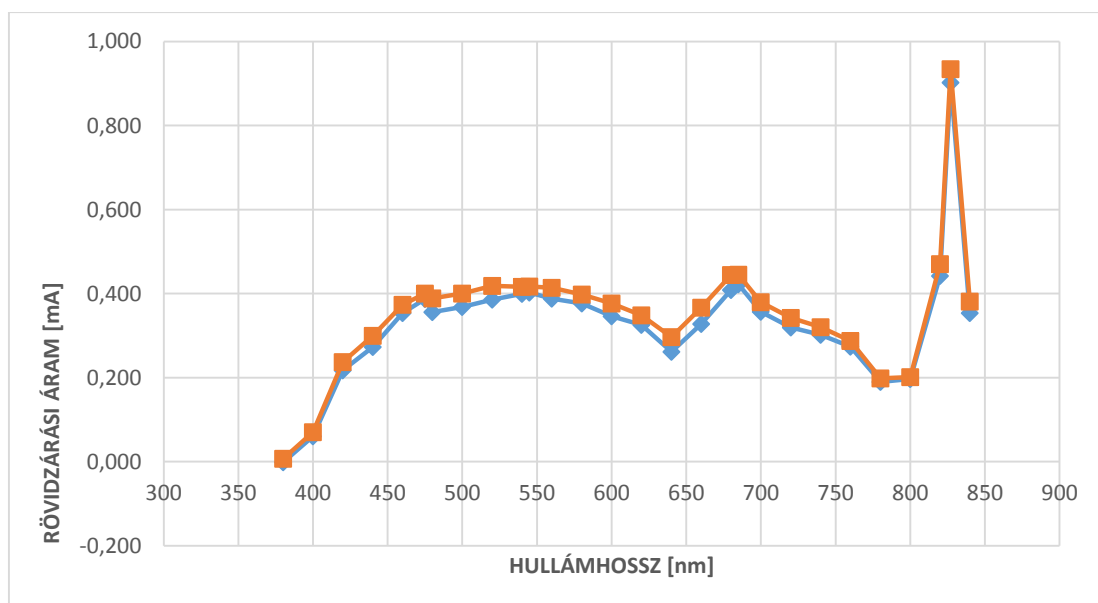
$$\Delta x = p \times \sigma_{n-1}$$

A teljes konfidencia szint nagyságát a $\pm \Delta x$ adja meg.

Vagyis a mérés során a mért érték (x) 95% pontossággal benne lesz a konfidencia intervallumban:

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$$

Az 5. diagram kék görbét úgy kaptam meg, hogy a rövidzárási áramok átlag értékeiből kivontam a valódi értékét, azaz a konfidencia-intervallum felét. A narancssárga görbét úgy állítottam elő, hogy a rövidzárási áramok átlag értékeihez hozzáadtam a valódi értékét, azaz a konfidencia-intervallum felét. A kék és a narancssárga görbe közti terület így a konfidencia intervallumot mutatja.



5. diagram. A rövidzárási áramok átlagértékeihez hozzáadott (narancssárga görbe) és kivont (kék görbe) valódi értékek a besugárzó fény hullámhosszának függvényében.

7. A probléma megoldásainak lehetőségei

A napelem új generációinak kell megvalósítania, hogy ne csak egy viszonylag szűk spektrum tartományban dolgozzanak, mint a jelenleg kereskedelemben kapható napelemek, mivel ez a tartomány csak egy része annak a hullámhossz tartománynak, amit hasznosítani lehetne. Nagy lehetőségek rejlenek az ultraibolya- és infravörös tartományok nagyobb fokú hasznosításában annak érdekében, hogy a hatásfok növekedjen, mert ezáltal a napelemek szélesebb szolárspektrumot lennének képesek hasznosítani. Mindez még olyan előnyt is magával vonna, hogy így kevesebb foton „menne kárba”, azaz nem hasznosulna a folyamatban. Ezáltal kevesebb lenne az a foton mennyiség, ami pusztán csak termikusan hat a napelemre. (A napelem működési hőmérsékletének emelkedése negatívan befolyásolja a cella rövidzárási áramát, ezáltal a hatásfokot is.) E hullámhossz-tartományok felhasználása más-más anyagi minőségű napelem félvezetőket igényel, mivel a félvezető anyagától függően változnak az hullámhossz-elnyelési tulajdonságok. A módszer elterjedésében, egyelőre gátat szabnak az előállításához szükséges anyagtechnológia bonyolultsága, és az e miatti magas költségek. Mostanában nagyon elterjedt kristályos szilícium alkalmazása a napelemeknél a kiforrt és olcsó technológia miatt következhetett be. Köztudott, hogy a szilícium nem a legmegfelelőbb anyag a napelem gyártáshoz, abszorpciós képessége rosszabb, mint más félvezetőké, ez az indirekt sávszerkezetnek is köszönhető. A jövőben a két és több komponensű vegyületek, félvezetők elterjedhetnek, mivel ezeknek az anyagoknak a fizikai tulajdonságai széles sávban megváltoztathatóak (pl.: sáv szélesség, abszorpciós képesség). Ezeknél a napelem struktúráknál már anyagszerkezeti úton befolyásolható az elnyelt fény hullámhossz tartománya. Már az ultraibolya tartományra és infravörös tartományra is kiterjedhetnek az elnyelési képességeik.

Többféle fejlesztési irány létezik a napelemek hatásfok növelése céljából. Ezek feloszthatók főbb fejlesztési irányvonalakra, bár ezek a fejlesztések igen szerteágazóak és összetettek. Itt most csak két irányvonalat említek meg. Az egyik a napelemre érkező fény intenzitásának növelése, a másik a spektrális válasz tartomány kiszélesítése.

A fény intenzitás növelésének ma az egyik legelterjedtebb eszköze a CPV technológia. Ekkor Fresnel lencsékkel koncentrálják a fénysugárzást a napelem cellára így az elért hatásfok már 30% fölött is lehet. Használatát a kis beruházási költség, és nagy hatékonyságának köszönheti [20].



29. ábra: Fresnel lencse segítségével koncentrált fény vetítése a napelem cellára
(CPV technológia)

A másik hatásfok növelésre alkalmas fejlesztés a különböző félvezető anyagok megválasztása és azok egy hordozó anyagra való integrálásával érhető el. E technológia által a napelem spektrális működési tartománya kiszélesedik. Ez azt jelenti, hogy energiahasznosítás optimalizálása elérhető úgy is, hogy az egymásra integrált félvezetők tiltott sávjait különböző nagyságúakra válasszuk meg így más hullámhossz tartományban lesznek a működési határaik. Ezeket az eszközöket más néven tandem celláknak nevezik. A technológia által a napelem cella tágabb hullámhossz-tartományok között képes villamos teljesítmény előállítására. Ennek a struktúrának a felépítése a következőképpen alakulhat ki. Mivel a fotonok behatolási mélysége függ a hullámhossztól, így máshol lesz az abszorpció is. Az ultraibolya sugárzási tartománybeli fotonok nagy foton energia értékekkel rendelkeznek és a felület felső rétegében nyelődnek el, ezért a tandem cella felső részébe a félvezetőnek nagy, akár 1,9eV nagyságú tillossávjuk is lehet. Az alsó rétegekbe főként az infravörös sugárzás jut el, az kisebb energiájú fotonokkal jellemezhető, ezért az ott alkalmazott félvezető 1,2eV-os tiltott sávval rendelkezhet, hogy nagyobb legyen a foton abszorpció [2]. Ezzel a technológiával el lehet érni, olyan nagyobb hatásfokú napelemet, amely a kiterjesztett hullámhossz-tartomány elnyelésnek köszönhető. A fotoáram növekedését az alábbi képlet segítségével is bizonyítani lehet:

$$I_{foto} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [I_E(\lambda) + I_B(\lambda) + I_K(\lambda)] d\lambda$$

I_E – emitter rétegben keletkező fotogenerált töltéshordozók

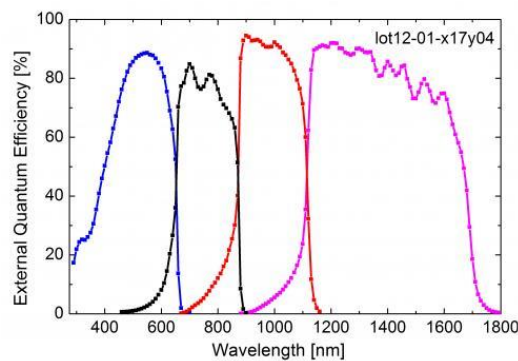
I_B - bázis rétegben keletkező fotogenerált töltéshordozók

I_K - kiürített rétegben keletkező fotogenerált töltéshordozók

A többrétegű celláknál az integrálás alsó és felső határa kiszélesedik, vagyis $\lambda_{min} - \lambda_{max}$ által, az integrált terület megnő, ezáltal a fotoáram nagysága is nő. Az alsó határt a besugárzott kis foton hullámhosszokra jellemző felületi abszorpció fogja meghatározni, a felső határt pedig

a tilossáv szélességére jellemző energia nagyság. A fejlesztések során nem csak kétrétegű, hanem akár három-, négy- és ötrétegű cellákat is gyártanak és használnak a mai naperőműi telepítések során. Ennek révén olyan félvezető anyagok építhetők össze, amiknek a hullámhossztól függő munkapontjai teljesen eltérnek. (Ezeket a CPV technikával szerelt 3-5 rétegű napelemeket, amiknek akár 40% hatásfok fölötti működési hatásfokuk is elérhető, egyelőre csak a naperőművekben hasznosítják [20].)

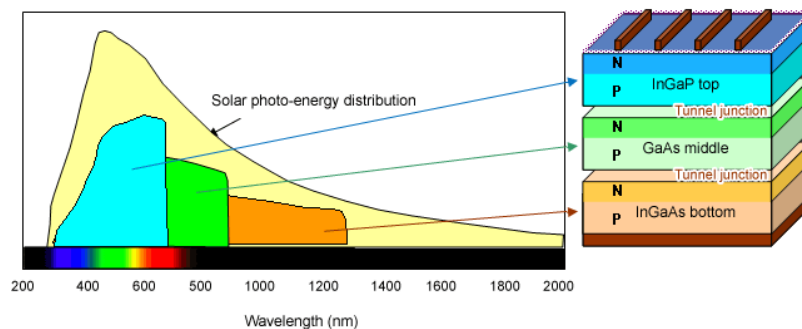
Gyakorlati megvalósítások a szélesebb szolárspektrum hasznosításával történő hatásfok növelése céljából: Ma a jelenleg elért legnagyobb napelem hatásfok 44,7%-os, ami hatalmas eredmény az eddig sorozatgyártásban elért és jónak számító 10-17%-os hatásfokokkal szemben [2,20]. Ezt az értéket úgy tudták elérni, hogy CPV technológiát alkalmaztak egy összetett, négy rétegű félvezetőnél. Ez a négyrétegű félvezető nagyon széles szolár spektrumban képes villamos energiát előállítani, amit az alábbi kép ábrázol grafikusan.



30. ábra. A külső kvantumhatásfok %-os értékei a besugárzó fény hullámhosszainak függvényében különböző napelem cella anyag típusokra.

Az egyes színjelölések mutatják a négy félvezetőre jellemző hullámhossz működési tartományát. A működési tartomány már az ultraibolya sugárzástól elkezdődik és a látható tartományon keresztül a nagy 1700nm-res hullámhosszúságú infravörös sugárzásig terjed.

Az alábbi ábra egy három rétegű InGaAs (indium gallium arzenid) napelem egyes rétegeinek működését mutatja a megvilágító fény hullámhossz-tartományaiban.



31.ábra: Három rétegű félvezető, és az egyes rétegek működési hullámhosszai

Irodalomjegyzék

- [1] Tanulmányaim során hallottam, tanultam.
- [2] Dr. Nemcsics Ákos: Napelem működése, fajtái és alkalmazása; BMF KVK 1188; Bp. (2005)
- [3] European Photovoltaic Industry Association: Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017; <http://www.epia.org/news/publications/>
- [4] Kuhlmann, Nicole: Napenergia-hasznosítás: Napkollektoros, napelemes berendezések; Cser kiadó; Bp.(2002)
- [5] European Commission: *The EU climate and energy package*; <http://ec.europa.eu/clima/policies/package/>
- [6]<http://www.alternativenergia.hu/mindent-egybeveve-kozel-3000-kiseromuvet-letesitettek-tavaly-magyarorszagon/67579>
- [7] http://chikansplanet.blog.hu/2014/05/05/kiseromuvet_a_portara
- [8] Dr. Péter Kádár, Andrea Varga: *Measurement of spectral sensitivity of PV cells*; SISY Konferencia 20-22 September, 2012, Subotica, Serbia.
- [9] <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf> (20.oldal, 6. bekezdés)
- [10] <http://pveducation.org/>
- [11] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>
- [12] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [13] DIGIKRÖM Monochromator DK-240 User Manual (használati utasítás leírásából)
- [14] http://www.stellarnet.us/products_spectrometers_BlueWave.htm
- [15] <http://www.spectralproducts.com/asbx175>
- [16] http://www.steca.com/index.php?Steca_TA_ES1_en
- [17] <http://www.fluke.com/Fluke/sген/Support/Manuals/default.htm?ProductId=56140>
- [18] http://www.amsolar.com/home/amr/page_164
- [19] <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf> (26. oldal, 1 bekezdés)
- [20] <http://www.mnnsz.hu/a-447-os-hatasfoku-napelemes-cella-legendaja/>

Ábra jegyzék:

1. ábra: <http://hirmagazin.sulinet.hu/hu/eletmod/miert-egunk-le>
2. ábra: <http://www.mnnsz.hu/a-447-os-hatasfoku-napelemes-cella-legendaja/>
3. ábra: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/spectral-irradiance>
4. ábra: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/radiant-power-density>
5. ábra: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency>
6. árba: <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf>
7. ábra: <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf>
8. ábra: <http://pveducation.org/pvcdrom/characterisation/spectral-response>
9. ábra: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0036_Introduction_to_electrons_in_crystals_HUN/vals_energiasvdiagramok.html
10. -12. ábra: <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf>
13. ábra: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>
14. ábra: <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
15. ábra: DIGIKRÖM Monochromator DK-240 User Manual (monokromátor használati utasítás leírásából vett ábra)
- 16.-19. ábra: Saját ábra
20. ábra: http://www.hmtech.com.tw/cache/ASB-XE-175EX_ASB-XE-175.pdf
- 21.-24. ábra: Saját ábra
25. ábra: <http://www.ldgi.com/technology-learning-center/uv-bonding-curing/material-absorption/>
26. ábra: <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf>
27. ábra: http://www.hmtech.com.tw/cache/ASB-XE-175EX_ASB-XE-175.pdf
28. ábra: <http://www.eet.bme.hu/~foldvary/oktatas/Napelemek.pdf>
29. ábra: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/08/tracking-the-cpv-global-market>
30. ábra: <http://phys.org/news/2013-09-world-solar-cell-efficiency.html>
31. ábra: <http://phys.org/news/2011-11-sharp-solar-cell-worlds-highest.html>

Táblázat jegyzék:

1. táblázat: Dr. Borsányi János: Világítástechnika; 41/2007; Bp.(2010)
- 2.-3. táblázat: Saját táblázat
4. táblázat: <http://pveducation.org/>
- 5.-8. táblázat: Saját táblázat