



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Elektronikus Eszközök Tanszék

# **Termikus tranziens mérés alkalmazási lehetőségei napelemmodulok termikus karakterizálásában**

TDK DOLGOZAT

*Készítette*  
Dudola Dóra Antónia

*Konzulens*  
dr. Ress Sándor BME-EET  
Plesz Balázs BME-EET

2014. október 22.

# TARTALOM

---

1	Áttekintés .....	2
2	Motiváció és célok .....	4
3	Elméleti háttér .....	5
3.1	Napelemek .....	5
3.1.1	A fény-villamos energiaátalakítás alapjai [1] .....	5
3.1.2	Napelem teljesítményét és hatásfokát befolyásoló tényezők: .....	7
3.1.3	Napelem típusai .....	9
3.1.4	Amorf szilícium napelemek .....	10
3.1.5	Kristályos szilícium napelemek .....	12
3.2	Termikus tranziens mérés .....	13
3.2.1	Az elektronikus és termikus rendszerek közötti analógia .....	14
3.2.2	Kumulatív struktúrafüggvény előállítása termikus tranziens válaszfüggvényből 16	
3.3	Irodalmi összefoglaló .....	18
4	Termikus tranziens mérések egykristályos szilícium napelemen .....	21
4.1	c-Si napelem integráló gömbben .....	21
4.2	c-Si napelem DCP elrendezésben .....	23
4.3	c-Si napelem szabad levegőben .....	27
5	Termikus tranziens mérések amorf napelemen .....	30
6	Összefoglalás .....	36
7	Irodalomjegyzék .....	37

# 1 ÁTTEKINTÉS

---

A villamos energia napjainkban elengedhetetlenné, az életünk részévé vált. Jelentőségére akkor döbbenünk rá, amikor a számunkra természetesnek tűnő, mindig jelen lévő energia valamilyen okból –akár rövidebb, akár hosszabb időre- megszűnik. Ezért is nagyon fontos az, hogy a fosszilis energiahordozók mellett megújuló társaik egyre nagyobb teret nyerjenek, melyek közül a legnagyobb potenciállal bíró a napenergia, mivel korlátlan mennyiségben áll rendelkezésre, kimeríthetetlen energiaforrás, és a napelem rendszer telepítése egyszeri ráfordítást igényel, azután a karbantartási költsége minimális. Nem utolsó sorban a napenergia tiszta, környezetbarát energiaforrás, tehát amellett, hogy a fosszilis energiahordozók által termelt energiaigényt csökkenti, még a környezetet sem terheli meg.

A fényt villamos energiává alakító eszköz, azaz a napelem felépítését, fizikai működését, hatásfokát befolyásoló tényezőit (mint például az alapanyagul szolgáló szilícium típusát, a struktúrát, az alkalmazott technológiát) számos szakirodalom mélyre menően tárgyalja. Ezekből ismert tény, hogy a napelemek hőmérsékletének növekedése feszültségcsökkenéssel, teljesítményromlással jár, azaz a napelemek teljesítménye és hatásfoka nagyban függ a hőmérséklettől. Annak ellenére, hogy a napelem modul teljes szerkezetének termikus viselkedése erősen befolyásolja a napelem cellákban kialakuló hőmérsékletet, a modulok termikus viselkedését eddig még nem vizsgálták kimerítően.

Félvezető eszközök termikus paramétereinek meghatározására gyakran alkalmazott és jól bevált mérési eljárás a termikus tranziens mérés, amellyel roncsolásmentesen állapíthatók meg a vizsgált eszköz termikus paramétereit. A mérési eljárás bármely elektronikus eszközön elvégezhető, amely tartalmaz egy kontaktusokon keresztül hozzáférhető p-n átmenetet. A napelem egy nagy felületű p-n átmenet, azaz tekinthetünk rá úgy, mint egy nagyon nagy felületű diódára, így elméletben ezt az eszközt is vizsgálhatjuk termikus tranziens méréssel. A mérés során kapott eredményből pedig kiszámíthatjuk a napelemet alkotó részek hőellenállását, illetve hőkapacitását, amikből képezhetjük az úgy nevezett struktúrafüggvényt, és így jellemezhetjük a struktúra minden rétegét. Azaz létre lehet hozni egy modellt, és azon keresztül vizsgálni az eszközt, anélkül hogy szétszednénk, roncsolnánk azt.

Ezen elméleti megfontolások alapján termikus tranziens vizsgálatokat végeztem különböző napelem szerkezeteken. A TDK munkám során amorf szilíciumból és kristályos szilíciumból készült napelem szerkezeteket vizsgáltam, és mindkét struktúrájánál olyan jelenségeket találtam, amelyek nem jelentkeznek a szokásos elektronikai eszközök termikus tranziens mérése során.

Amorf szilícium napelemek esetén megfigyeltem, hogy különböző időben elvégzett, de ugyanolyan nagyságú árammal meghajtva az eszközt annak struktúrafüggvénye megváltozik, a változás pedig valószínűsíthetően a szilícium rétegben megy végbe. A jelenség a degradációval, Staebler-Wronski hatással magyarázható, miszerint nagy teljesítménnyel való gerjesztés hatására a szilícium rétegben a lógó kötések passziválására szolgáló hidrogén atomok felszabadulnak, és ezzel megnövekszik a rekombinációs sűrűség a napelemben. Ez megváltoztatja a napelem karakterisztikáját, és így a feszültség hőmérsékletfüggését. Munkám során hőkezeléssel próbáltam a keletkezett lógó kötések passziválni és igazolni a Staebler-Wronski hatást.

Továbbá megfigyeltem azt a jelenséget, hogy termikus tranziens mérés közben különböző nagyságú fűtőáramokkal meghajtva a napelemet különbözik a rendszer gerjesztésre adott

válasza, így a struktúrafüggvénye is (ideális esetben - például egy diódát lemérve - azt tapasztalnánk, hogy különböző fűtőáramok hatására együttfutó struktúrafüggvény sereget kapnánk). A fűtőáramot növelve a struktúra hőellenállása csökkent, majd egy adott érték felett beállt, és növekvő fűtőáram hatására nem emelkedett tovább. Ezt a jelenséget mind amorf, mind kristályos szilícium napelemeknél megfigyeltem.

E jelenség azzal magyarázható, hogy nagyobb áramokkal hajtva a napelemet, nagyobb felületet fűtünk meg, ezáltal nagyobb térfogatban történik a hőelvezetés, ami miatt megváltozik a hőellenállás, és a hőkapacitás. Az elmélet igazolása érdekében hőkamerás képeket készítettem, illetve potenciáltérképet vettem fel különböző áramokkal meghajtott napelemekről. Mindkét esetben látszott, hogy növekvő áramok esetén a napelemek egyre nagyobb felületén következik be disszipáció, ami igazolja elméletünket.

Munkám során termikus transziens méréseket végeztem különböző napelem szerkezeteken, és új jelenségeket találtam, melyeket eddig még más elektronikus eszközöknél nem tapasztaltunk, és ezekre a jelenségekre dolgozatomban magyarázatot adok.

## 2 MOTIVÁCIÓ ÉS CÉLOK

---

Termikus tranziens mérések napelemen. Egy mérési eljárás, amely elsősorban nem napelemek analizálására lett kitalálva, és egy eszköz, amit általánosságban nem elektromos eszközként, hanem áramgenerátorként képzelünk el.

A termikus tranziens mérést az elektronikai eszközök belsejében lévő, működés közbeni hőmérsékleti viszonyok feltérképezésére találták ki, annak érdekében, hogy roncsolásmentesen lehessen vizsgálni az eszközt, feltárni az esetleges hibahelyeket, ezáltal növelni a megbízhatóságot. Az elmúlt években az integrált áramkörök jelentős méretcsökkenésen mentek keresztül, ezáltal növekedhetett az egységnyi felületen elhelyezhető tranzisztorok száma, de mindennek ára van. A méretcsökkenésnek és az integráltság növekedésének köszönhetően a félvezető eszközök fogyasztása rohamosan megnőtt, és a disszipáció miatti melegedés problémát jelenthet, akár az eszköz elromlásához is vezethet. Ezért fontos az elektronikai eszközök termikus karakterizációja, azaz, hogy ismerjük az eszközt felépítő struktúrát és annak jellemzőit, termikus viselkedését.

A napelem fizikai működését, teljesítményének függését a hőmérsékletváltozástól már kimerítően tárgyalja a szakirodalom, és azzal a problémával, hogy hogyan lehetne egy napelem felmelegedését kontrollálni, már sokan foglalkoztak. Érdekes módon a napelem termikus viselkedését azonban nem igazán vizsgálták eddig, és ez az a pont, ahol a termikus tranziens mérés és a napelem összekapcsolódik. Eszközünk felépítését tekintve megállapíthatjuk, hogy egy laterális kiterjedésében nagyon nagy diódáról beszélünk. Tehát elméletileg, mint félvezetővel, p-n átmenettel rendelkező eszközt, tudnunk kell rajta termikus tranziens méréseket végezni. A termikus tranziens válasz mérése egy újszerű megközelítése a napelem vizsgálatának, a tanszéken kívül csak néhány más országban foglalkoztak eddig ezzel, a méréstechnika napelemekhez való adaptálása még gyerekcipőben jár, a szakirodalom eddig leginkább a napelemek termikus tranziensek mérése során felmerülő problémákat ismertette, tényleges, jól kidolgozott és megbízható mérési eljárások egyelőre nem léteznek napelemek termikus tranziens mérésére. Ezért dolgozatom célja az, hogy megvizsgáljam, miként lehet különböző típusú (amorf és kristályos szilícium) napelemmodulokon megbízható eredményeket szolgáló, reprodukálható termikus tranziens méréseket végezni, illetve milyen problémák adódhatnak a mérés közben, és hogyan lehet ezeket kiküszöbölni a mérési körülmények optimalizálásával. Hosszú távú célom egy olyan méréstechnika megalkotása, amellyel a napelemmodulokat vizsgálva olyan paramétereket lehet megbízhatóan kinyerni, amelyek napelemek modellezésében és termeléselőrejelzésében is alkalmazhatók.

## 3 ELMÉLETI HÁTTÉR

---

### 3.1 NAPELEMEK

Napelemek alatt a nap fényét elektromos árammá alakító fényelektromos eszközöket értjük. A különböző megoldások és technológiák abban közösek, hogy a szerkezet alapvetően két kontaktus közötti p-n átmenetből állnak, azaz a fény által generált töltéshordozó párok szétválasztását célzó beépített elektromos erőterre épülnek. Amikor egy megfelelő energiájú foton a p-n átmenet közelében elnyelődik, a kiürített rétegben felépülő térerő által szétválasztott töltéshordozók a megfelelő kontaktusokon át elvezetve elektromos áramot hoznak létre. Igazi nagy előnye ennek a módszernek az, hogy a fény elektromos árammá történő átalakítása mozgó alkatrész nélkül, közvetlen módon történik, ráadásul a napelemek addig működnek, amíg fény éri a szerkezetet.

#### 3.1.1 A fény-villamos energiaátalakítás alapjai [1]

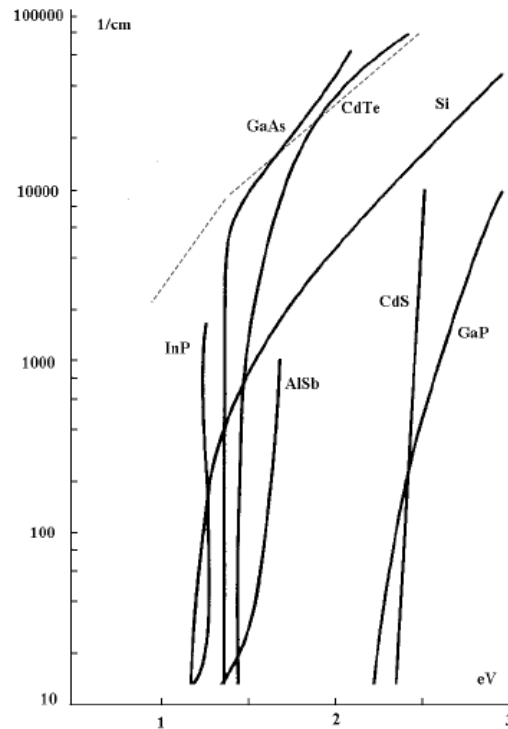
A félvezető kristályra eső fotonok bizonyos körülmények között gerjeszthetik a kristály vegyérték-elektronjait. Amennyiben ez a gerjesztés elég erős ahhoz, hogy az elektronok a következő, megengedett magasabb energiaszintre (vagyis a vezetési sávba) kerüljenek, akkor a gerjesztés az egyensúlyi koncentrációkhoz képest megemeli a mozgékony töltések sűrűségét. Ennek energetikai feltétele az, hogy a beeső foton energiája nagyobb legyen, mint a tiltott energiasáv szélessége. A fény és a félvezető kristály kölcsönhatásának egyik eredménye tehát a foton elnyelődése és szabad töltéshordozók keletkezése lehet. A fotonok elnyelődésére a következő differenciálegyenlet írható fel:

$$dI_f = -\alpha I_f dx \quad (3.1)$$

A differenciálegyenlet megoldása:

$$I_f = I_{f0} \exp(-\alpha x) \quad (3.2)$$

ahol  $I_{f0}$  beeső fényintenzitás. A szilárdtestbe behatoló fény intenzitása tehát exponenciálisan csökken a mélység függvényében. A csökkenés mértékére jellemző az  $\alpha$  abszorpciós tényező. Az abszorpciós tényező azt adja meg nekünk, hogy egy felületre merőlegesen eső energia hányad részét nyeli el.



1. ábra. Az  $\alpha$  abszorpciós tényező függése a beeső fény energiájától [1]

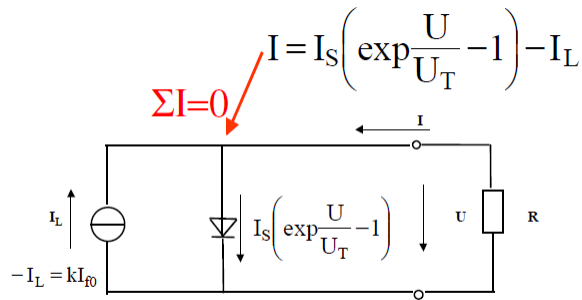
Látható, hogy a tiltott sáv szélességénél nagyobb energiájú sugárzás igen vékony tartományban elnyelődik, ugyanakkor az elnyelés igen meredeken csökken, ha a beeső foton energiája kisebb a tiltott sáv szélességénél. A szaggatott vonal az amorf szilícium elnyelését mutatja.

A félvezetőben megvilágítás nélkül is generálódnak elektron-lyuk párok. A hőmozgás következtében szabad töltéshordozók keletkezése (termikus generáció) ekkor épp egyensúlyt tart a rekombinációval.

Megvilágítás hatására pedig az abszorpciónak köszönhetően elektron-lyuk párok generálódnak. Ha a félvezető szerkezetbe behatoló fotonok a p-n átmenet kiürített rétegében, vagy annak közelében nyelődnek el, akkor nagy a valószínűsége annak, hogy az abszorpció következtében generálódott elektronok, illetve lyukak az átmenethez diffundáljanak, mielőtt még rekombinációval eltűnének. Az átmenet p és az n oldala között kialakuló diffúziós potenciál értéke a kilépési munkák különbségével is arányos, annak  $1/q$ -szorososa, ahol  $q$  az elektron töltése.

$$\frac{W_{kip} - W_{kin}}{q} = U_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad (3.3)$$

A diffúziós potenciál a kiürített réteg két oldala közötti tartományra esik. Minthogy a kiürített réteg igen vékony (kb.  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  m), a beépített tér nagyon nagy lehet. A p-n átmenetben fellépő beépített tér a kisebbségi töltéshordozókat átsodorja az átmenet másik oldalára, így járulékos áramösszetevő lép fel. Ez az áram hozzáadódik az átmenet előfeszítése során fellépő áramához. Ilyen feltételek mellett rendszer fizikai modelljében szerepeltetni kell egy, a p-n átmenettel párhuzamosan kapcsolt áramgenerátort, melynek forrásárama arányos a beeső fénysűrűséggel:



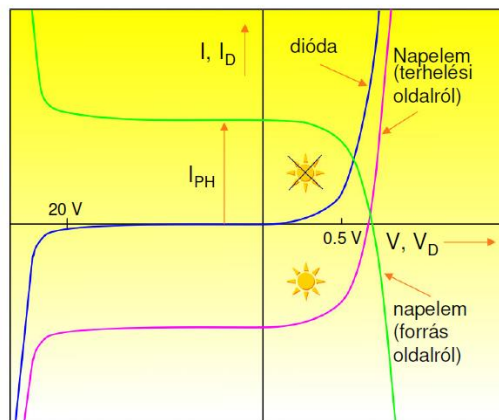
2. ábra. Az ideális p-n átmenet helyettesítő kapcsolása megvilágítás esetén [1]

Az átmeneten áthaladó egyes áramösszetevők részletezve a következők:

- a termikus generációval szabaddá vált n oldali lyukak és p oldali elektronok diffúziója az átmenet széléhez, majd sodródási árama az átmeneten keresztül ( $I_S$ ),
- a fény által generált n oldali lyukak és p oldali elektronok diffúziója az átmenet széléhez, majd sodródási árama az átmeneten keresztül, kiegészülve az átmenet kiürített rétegében generálódott elektron-lyuk párok szétszóródásából adódó árammal ( $I_L$ ),
- az n oldali elektronok és p oldali lyukak diffúziója a nyitó feszültséggel csökkentett diffúziós potenciállal szemben ( $I_S \exp \frac{U}{U_T} - 1$ ).

A megvilágított p-n átmenetre érvényes összefüggés:

$$I = I_S \left( \exp \frac{U}{U_T} - 1 \right) - I_L \quad (3.4)$$

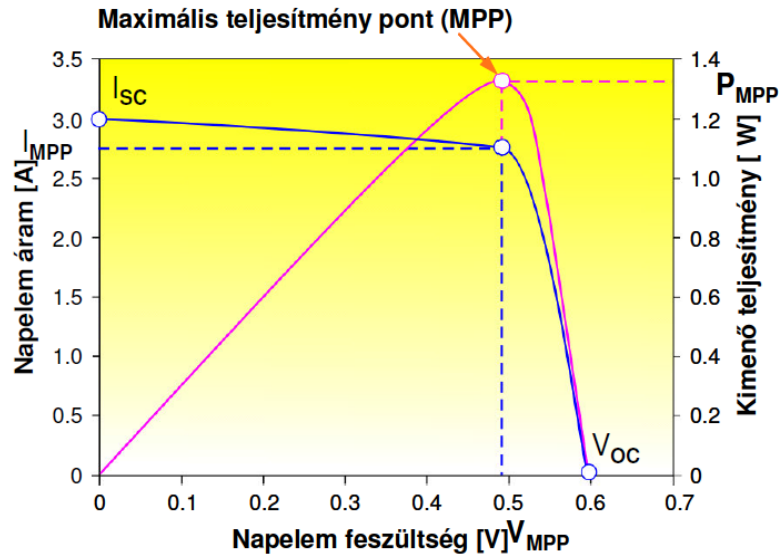


3. ábra. Napelem karakterisztikája megvilágítás esetén [2]

### 3.1.2 Napelem teljesítményét és hatásfokát befolyásoló tényezők:

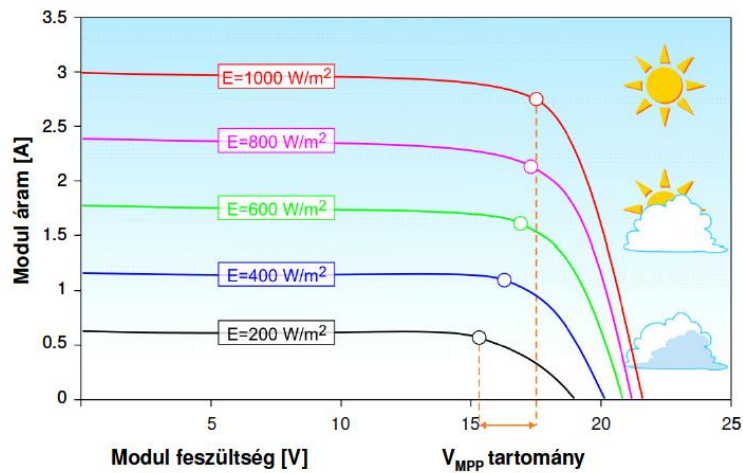
Ahhoz, hogy a megkapjuk a napelemből kinyerhető teljesítményt, meg kell vizsgálnunk az I-U karakterisztikát. A külső terhelésen leadott teljesítmény kiszámolható a munkaponthoz tartozó feszültség és áram értékek szorzataként. A teljesítménygörbének egy adott pontban, a maximális teljesítmény pontban (MPP) maximuma van. Erre a pontra jellemző értékek a maximális teljesítmény ( $P_{MPP}$ ), a maximum pontbeli áram ( $I_{MPP}$ ) és a maximum pontbeli feszültség ( $U_{MPP}$ ).





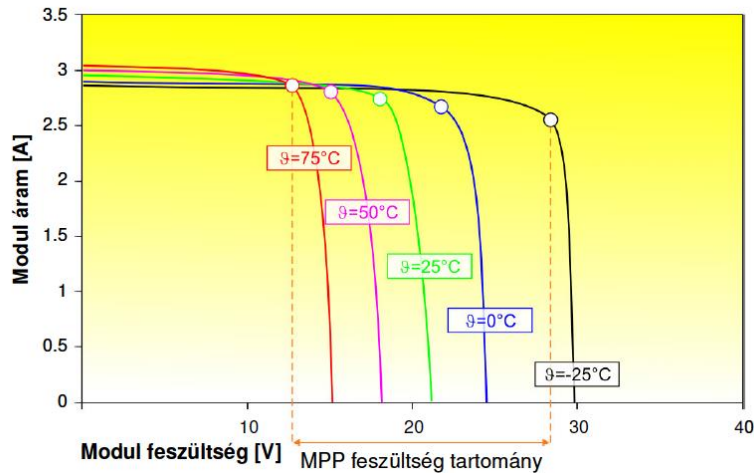
4. ábra. Napelem teljesítménye az optimális munkapontban [2]

A napelem villamos paraméterei a megvilágító fény spektrumától, intenzitásától és a napelem hőmérsékletétől is függenek. Állandó hőmérséklet, de különböző besugárzás esetén egy karakterisztikus görbe sereget kapunk.



5. ábra. Kristályos szilícium napelem modul I-U-karakterisztika görbéi különböző besugárzási értékek esetén állandó hőmérséklet mellett [2]

A félvezetők legtöbb anyagi jellemzője erősen hőmérsékletfüggő, és emiatt a rövidzárási áram, az üresjáratú feszültség és a maximális teljesítmény a paramétereivel együtt ( $I_{MPP}$ ,  $U_{MPP}$ ) szintén hőmérsékletfüggő mennyiségek.

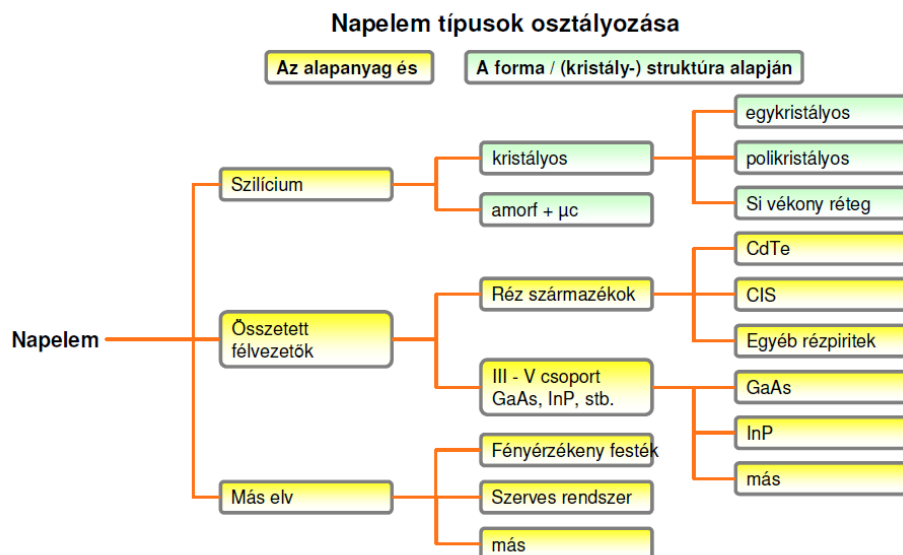


6. ábra. Kristályos szilícium napelem modul I-U karakterisztika görbéi különböző hőmérsékletek esetén azonos besugárzás mellett [2]

A napelem hatásfokát a környezeti és a konstrukcióval összefüggő tényezők egyaránt befolyásolják. A környezeti tényezők közül a hőmérséklet a legfontosabb, de ide lehet sorolni a cella felületének tisztaságát, a megvilágítás erősségét és a cella munkapontjának megválasztását is.

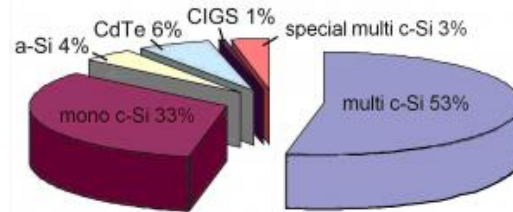
A hőmérséklet növekedésének hatására a diffúziós hossz növekedik, mert nő a diffúziós állandó és a töltéshordozók élettartama is. Ez némi növekedést eredményez a rövidzárási áram értékében. A p-n átmenet  $I_S$  telítési árama azonban annyira megnövekszik a termikusan generált kisebbségi töltéshordozók nagyobb koncentrációja miatt, hogy az elérhető kimeneti feszültségek csökkenése lerontja a lehető teljesítményt és a hatásfokot.

### 3.1.3 Napelem típusai



7. ábra. Napelem technológiák és jellemzőik (az összetett félvezetőket vegyület félvezetőknek hívjuk) [2]

Fotovoltaikus alkalmazásokhoz különböző félvezető anyagokat használhatunk, amelyeknek megfelelőek a tulajdonságaik (tiltott sáv szélessége, abszorpciós tényező, stb). Közülük a szilícium a legszélesebb körben elfogadott és alkalmazott a napelem gyártásban. A szilícium alapvető előnye, hogy nagyon sok található a természetben és jól ismert anyag, jól bejáratott gyártástechnológiával. A szilícium alapanyagot különböző kristályszerkezettel használják: monokristály, multikristály és az amorf szilícium. A napelem gyártásnál használt különböző anyagok termelési aránya látható a 8. ábrán.



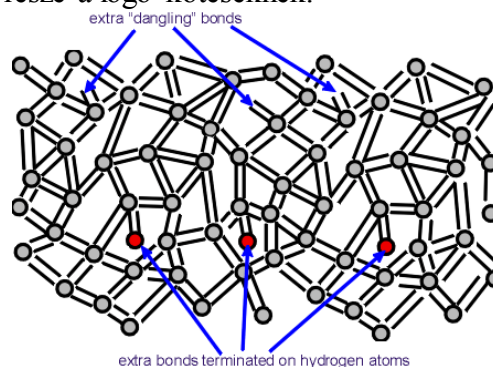
8. ábra. Termelési arány a PV technológiában [3]

Az TDK keretében amorf vékonyréteg (a-Si) és egykristályos szilícium napelemekkel foglalkoztam, ezért azokat mutatom be a továbbiakban részletesen.

### 3.1.4 Amorf szilícium napelemek

Az amorf félvezetők, így az amorf szilícium is, vékonyréteg formában viszonylag könnyen előállíthatók. Az amorf szilícium napelemek olcsó hordozóra leválasztott, amorf anyagot tartalmazó rétegszerkezetek, ahol az alapanyaggal szembeni követelmények gyengébbek, mint az egykristályos napelemeknél.

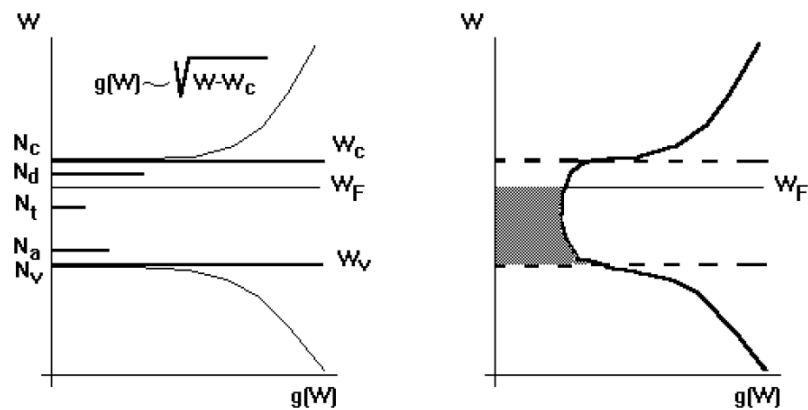
Az amorf szilárdtesteket, ellentétben a kristályos anyagokkal, az jellemzi, hogy hiányzik az atomok egymáshoz képest megnyilvánuló hosszabb távú rendezettsége. Nem igaz azonban az sem, hogy az amorf félvezetők atomjai teljesen rendezetlenül helyezkednek el. Emiatt az anyag tulajdonságai megváltoznak. A lógó kötések passzíválni kell, hogy csökkentsük a rekombinációs központokat. A passziválás általában hidrogén atommal történik, aminek köszönhetően telítődik egy része a lógó kötéseknek.



9. ábra. Amorf Si szerkezet lógó kötésekkel, illetve a lógó kötések lezáró H atommal [4]

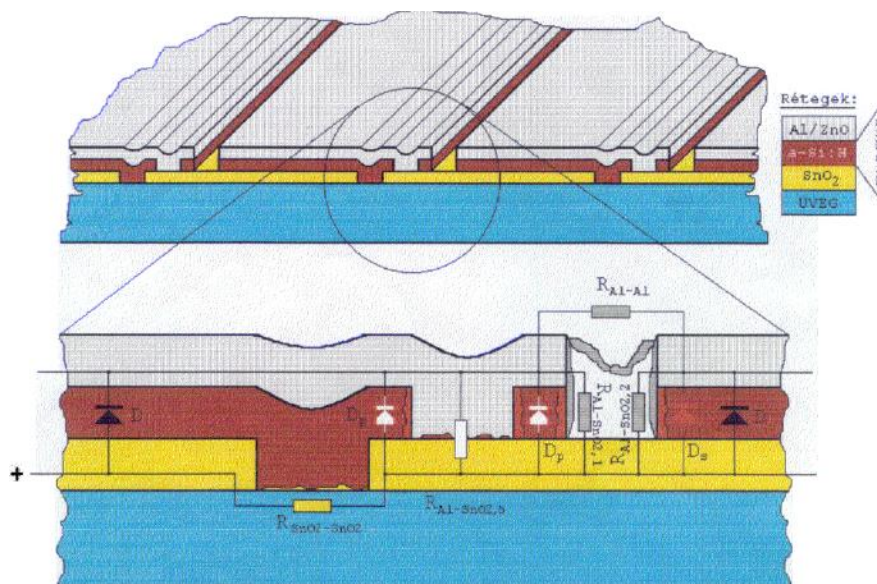
A passziválás ellenére, az amorf szilícium tulajdonságai jelentősen eltérnek a kristályos szilíciumétól. Például amíg a kristályos Si tiltott sáv szélessége 1,1 eV, addig az amorf társáé 1,7 eV, továbbá az abszorpciós tényezője sokkal magasabb, mint a kristályos Si-nak. Ezen felül a nagyszámú lógó kötések az anyagban nagy hibasűrűséget és rövid diffúziós hosszakat eredményeznek (a rendezetlenség miatti rekombinációs központoknak köszönhetően). Az amorf félvezetők energiasáv diagramjában láthatjuk, hogy a sávszélek kevésbé élesek, mint a

kristályos társaikban, és a tiltott sávban több nagyságrenddel nagyobb a megengedett állapotok, csapdák száma. [1]



10. ábra. Kristályos és amorf félvezető sáv szerkezete, a megengedett állapotok elhelyezkedése és sűrűsége [1]

A Fermi szint ( $W_F$ ) helyzetét az amorf félvezetőkben is a tiltott sávbeli állapotok száma és energia eloszlása állítja be. Az állapotok nagy száma miatt azonban csak nagyon erős adalékolással lehet lényeges változást létrehozni a Fermi szint helyzetében, valamint határozott N, illetve P vezetési tartományokat kialakítani.



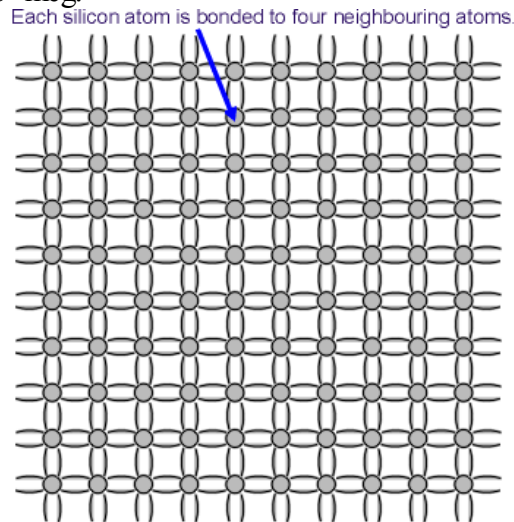
11. ábra. Amorf szilícium cella felépítése, Si erős adalékolása:  $n^+ip^+n^+ip^+$  [5]

Az amorf félvezetők abszorpciós tényezője, és annak foton energia függése is eltérő. Az abszorpció a látható fény tartományában mindenütt körülbelül egy nagyságrenddel nagyobb az egykristályos szilíciumhoz képest. Közel 1 mikrométer vastagságú amorf szilícium réteg a teljes spektrumból már szinte az egész látható tartományba eső részt elnyeli.

Az amorf félvezetőkben a sok hibahely miatt a szabad töltéshordozók nem jutnának messzire, ezért célszerű minél vékonyabb réteget alkalmazni, hogy lehetőleg ne menjen végbe rekombináció. Szerencse tehát, hogy a nagyobb abszorpció miatt a cella vékonyabb rétegek esetén is elnyeli a beeső fény zömét.

### 3.1.5 Kristályos szilícium napelemek

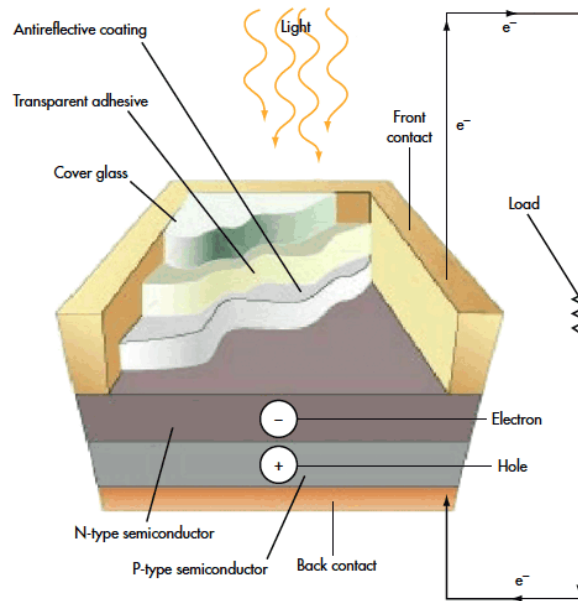
A szilícium napelem cellák nagy része Si szeletekből készül, amelyek főként egy-, illetve multikristályosak. Az egykristályos szeletek jobb paraméterekkel, tulajdonságokkal rendelkeznek, de drágábbak is, mint multikristályos társaik. Az egykristályos szilíciumnak rendezett kristályszerkezete van, ami azt jelenti, hogy az atomok elhelyezkedésében hosszú távú rendezettség figyelhető meg.



12. ábra. Rendezett Si atomok által meghatározott kristályszerkezet szemléltető ábrája. Minden szilícium atomnak négy elektronja van a külső héjon, így egy Si atom másik négy Si atommal van kovalens kötésben [4]

Egykristályos Si cella létrehozása bonyolult. Figyelni kell arra, hogy minél kevesebb fény verődjön vissza, azaz alkalmazni kell egy reflexiót csökkentő bevonatot is. Itt (ellentétben az amorf szilíciummal) hosszú távú rendezettség van az atomok között, tehát kevesebb kristályhiba található a tömbben, aminek köszönhetően kisebb a rekombinációs valószínűség. De az egykristályos Si abszorpciós tényezője kisebb, mint az amorf Si-é, így vékony rétegek esetén nem nyel el sok fényt, tehát vastagabb Si réteget kell alkalmaznunk annak érdekében, hogy minél több fényt tudjon elnyelni a cellánk. A p-n átmenetet a megfelelő mélységben kell létrehozni, hogy nagy térfogatban generálódhassanak elektron-lyuk párok, és a kisebbségi töltéshordozók élettartama elég nagy legyen ahhoz, hogy a generált töltéshordozók elérjék azokat a tartományokat, ahol nagy a beépített tér.

Egy szokványos egykristályos Si napelem cella lényegében 9 rétegből áll. Az antireflexiós réteg felett átlátszó ragasztóval rögzítjük az üveget, annak érdekében, hogy az összes fény átszűrődjön az üvegen és a ragasztón. A félvezető technológiához hasonlóan egy N típusú réteggel szemben van egy P réteg. Mindkét réteget kivezelve (elektromos kontaktussal ellátva), tudjuk a cellából az áramot kivenni. A hátsó oldalon a napelemet ragasztóval rögzítjük a hordozóhoz.



13. ábra. Egy szokványos egykristályos Si napelem cella [5]

## 3.2 TERMIKUS TRANZIENS MÉRÉS

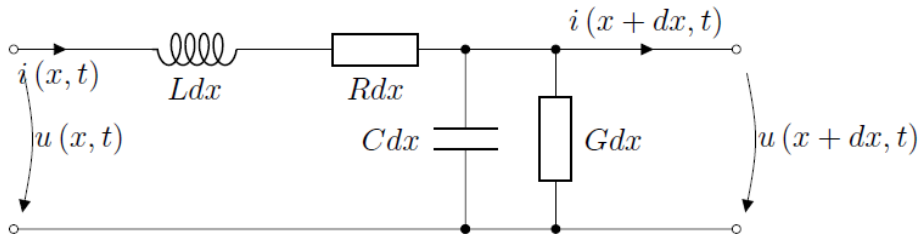
A félvezető eszközök termikus paramétereinek meghatározására az egyik elterjedt módszer a termikus tranziens mérés. Félvezető eszközöknél a hővezetés útja egydimenziós, azaz az aktív területen keletkezett hő egy irányban terjedve jut el a környezetig. A többi irányba (széleken, kivezetések mentén) történő hővezetés általában elhanyagolható. Termikus tranziens mérés segítségével megállapítható egy vizsgált struktúra egyes rétegeinek, alkotóelemeinek a hőellenállása és kapacitása. Az eljárás egyik nagy előnye az, hogy kész alkatrészen is elvégezhető az egész rendszer vizsgálata anélkül, hogy szét kellene szednünk azt.

Ám egy olyan áramköri hálózatot, ami megfelelően adja vissza a termikus rendszer viselkedését, nem egyszerű megalkotni, ugyanis ha például veszünk egy tokozott IC-t, ahol az áramkör az egész rendszer hőforrása, láthatjuk, hogy a hőellenállás és a hőkapacitás token belüli eloszlása nem határolható be egzakt módon. A hőáramunk útját vizsgálva azt vesszük észre, hogy a hőellenállás és a hőkapacitás (így a rendszerünk időállandói is) folytonosan változnak. Tehát a rendszerünk egy elosztott rendszer. A termikus viselkedés modellezéséhez egy RC kétpólust használhatunk, ami a hőelvezetést jellemzi, vagyis a hő keletkezésének helyétől milyen út vezet el a külvilágig. A rendszer leírásához szükségünk van az időállandókra, és elosztott rendszer lévén, a termikus rendszerek elosztott paraméteres RC hálózatokkal írhatóak le. Az időállandók meghatározására szolgál az időállandó-spektrum. A több időállandóval rendelkező RC hálózatot a Foster modellnek megfelelően tudjuk ábrázolni.

## 3.2.1 Az elektronikus és termikus rendszerek közötti analógia<sup>1</sup>

### 3.2.1.1 Villamos rendszerek tranziense:

A villamos rendszerek tranziensének vizsgálatához a távíróegyenletekből indulunk ki.



14. ábra. A távvezeték egy elemi szakaszának helyettesítő képe

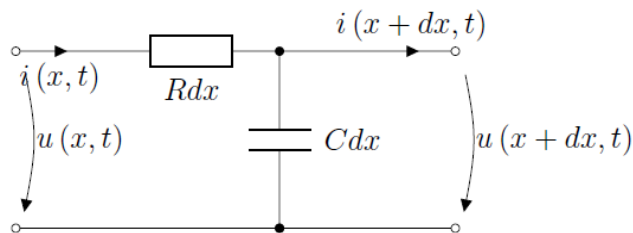
$$\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) = -Ri(x, t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = Gu(x, t) - C \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \quad (3.6)$$

$L = G = 0$  peremfeltételek esetén a következő módon egyszerűsödnek az egyenleteink.

$$\frac{\partial}{\partial x} u(x, t) = -Ri(x, t) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = C \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \quad (3.8)$$



15. ábra. Az egyszerűsödött RC modell

### 3.2.1.2 Termikus rendszerek tranziense

<sup>1</sup> Szalai Albin diplomatervezés, Termikus tranziens mérés a datkiértékelő szoftver továbbfejlesztése, BME 2009. A szerző engedélyével

A termikus rendszerek vizsgálatához a hővezetés egyenletéből indulunk ki.

$$k \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) - \rho c \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = 0 \quad (3.9)$$

ahol  $k$  a fajlagos hővezetőképesség,  $c$  a fajhő,  $\rho$  a sűrűség és  $T$  a hőmérséklet.

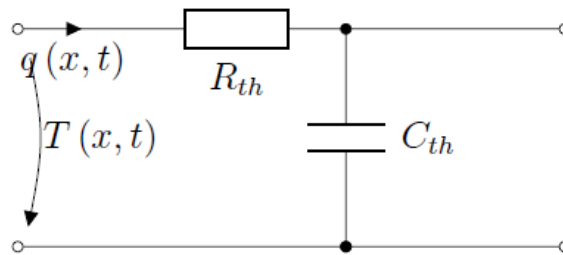
Fourier törvénye alapján felírható a hőáram összefüggése, így a következő egyenletrendszer adódik:

$$q = -k \frac{\partial}{\partial x} T(x, t) \quad (3.10)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) - \rho c \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = 0 \quad (3.11)$$

ahol  $q$  a hőáram.

$$\frac{\partial}{\partial x} T(x, t) = -\left(\frac{1}{k}\right) q(x, t) \quad (3.12)$$



16. ábra. Termikus rendszerek modellje

$$\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = -(\rho c) \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} T(x, t) = -R_{th} q(x, t) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = -C_{th} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) \quad (3.15)$$

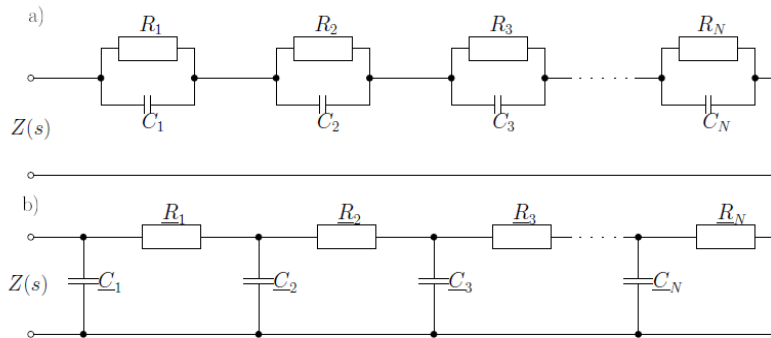
ahol  $R_{th} = \frac{1}{k}$  és  $C_{th} = \rho c$ .

(3.7), (3.8) illetve (3.14), (3.15) között egyértelműen felfedezhető az analógia  $u, T$  illetve  $i, q$  megfeleltetéssel. Mivel sikerült megtalálnunk a megfeleltetést, minden termikus probléma vizsgálatát visszavezethetjük villamos RC hálózatok vizsgálatára.



### 3.2.2 Kumulatív struktúrafüggvény előállítása termikus tranziens válaszfüggvényből

A napelemben a hővezetés útját tekinthetjük egydimenziósnak, és első közelítésben egy elosztott paraméteres RC hálózattal modellezhetjük. Ábrázolhatjuk a Cauer, illetve a Foster modellnek megfelelően, és ez a két modellt egymásba átalakítható. Termikus hálózatok leírására a Cauer modellt alkalmazzuk, ami sorba kapcsolt ellenállásokból és a csomópontokat a földre kötő kapacitásokból áll. Azért ezt a modellt használjuk, mert a valóságban a hőkapacitások mindig a földre kapcsolódnak.

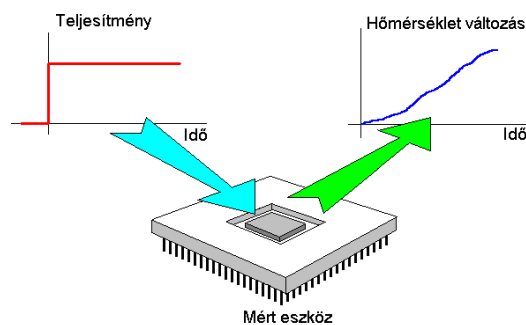


17. ábra. RC kétpólus a) Foster, b) Cauer helyettesítése<sup>2</sup>

Ahhoz, hogy megkapjuk a rendszer egyes elemeire jellemző hőellenállást és hőkapacitást, egységugrás gerjesztést adunk a hálózatra, és vizsgáljuk annak válaszát. A rendszer válaszfüggvénye:

$$a(t) = \sum_{i=1}^N R_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3.16)$$

ahol  $R_i$  a hálózat  $i$ -dik elemére jellemző amplitúdó,  $\tau_i$  pedig a hozzá tartozó időállandó. A gyakorlatban az átmeneti függvényt termikus tranziens méréssel határozhatjuk meg, azaz mérjük, hogy adott teljesítmény hatására mekkora hőmérsékletváltozás megy végbe az eszközön.



18. ábra. Termikus tranziens mérés elve<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Szalai Albin diplomatervezés, Termikus tranziens mérése a datkiértékelő szoftver továbbfejlesztése, BME 2009. A szerző engedélyével

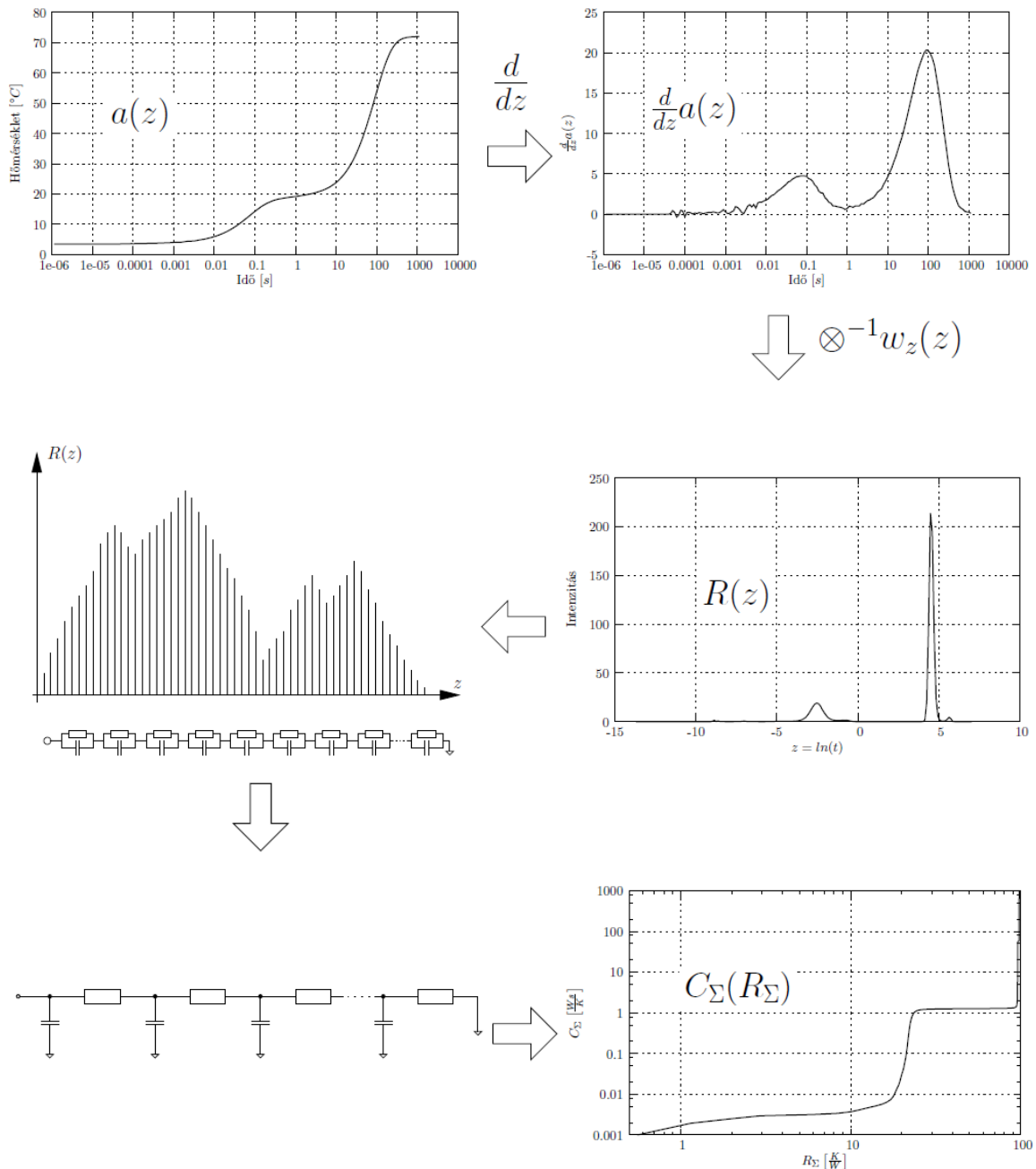
<sup>3</sup> Ress Sándor doktori értekezés, Érintésmentes anyagvizsgálati és termikus mérések egyes problémái, BME 2006. A szerző engedélyével

$P$  gerjesztést adva a rendszerre a hőmérséklete a következőképpen változik:

$$aT(t) = P \sum_{i=1}^N R_i(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3.17)$$

ahol  $\tau_i = R_i C_i$ .

Tehát egy rendszert leíró hálózatot mérésekre alapozva elő tudjuk állítani a következő lépések segítségével:



19. ábra. Kumulált struktúrafüggvény előállításának lépései [7]

1. Megmérni a rendszer egységgrás gerjesztésre adott válaszát. A mért válaszfüggvényt logaritmikus idő léptékűvé kell alakítani.
2. A logaritmikus válaszfüggvényt  $z$  szerint numerikusan deriválni kell.

3. A fix  $W(z)$  függvénnyel el kell végezni a dekonvolúció műveletét megfelelő pontossággal (frekvenciatartományban a dekonvolúció művelet osztásnak felel meg).
4. A kapott időállandó spektrumot diszkretizálni kell.
5. A diszkrét spektrumból nyert Foster hálózatot Cauer hálózattá kell alakítani.
6. A Cauer hálózat alapján összegezni a csomópontok hőellenállását és hőkapacitását és a kumulatív struktúrafüggvényt kiszámolni. Deriválással meghatározni a differenciális struktúrafüggvényt <sup>4</sup>

### 3.3 IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

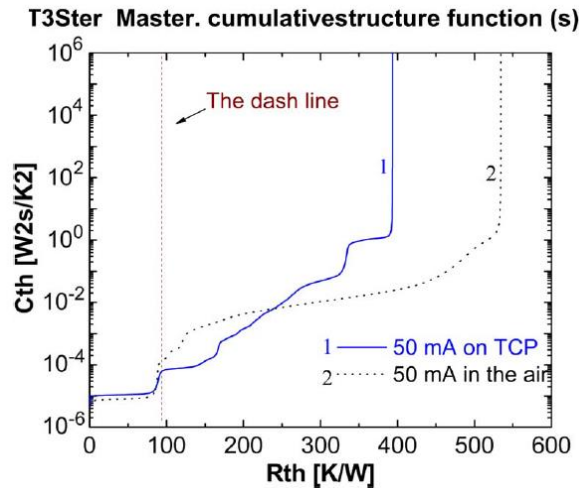
A napelemeket általában úgy kezelik, mint generátorokat, és csak kevesen vizsgálják úgy, mint egy elektronikus eszközt. A teljesítménye erősen hőmérsékletfüggő, ezért azt, hogy az eszköz feszültségére és ezáltal a teljesítményére milyen hatással van a hőmérsékletváltozás, kimerítően tárgyalja a szakirodalom. Ám a napelem termikus viselkedésével kevesen foglalkoztak, pedig ha ismernénk az eszköz termikus viselkedését, akkor abból modellt tudnánk alkotni, és így termikus tervezéssel jobb hatásfokot lehetne elérni, illetve minősítésnél egyszerűbben figyelembe tudnánk venni a termikus hatásokat. Továbbá a termikus paraméterek ismeretében a termikus viselkedés optimalizálása is tervezhetőbbé válna. A termikus transziens válasz mérése egy újszerű megközelítése a napelemek vizsgálatának, eddig a tanszéken és pár országban foglalkoztak ezzel, de nagy áttörést még nem sikerült elérni, mert különböző problémákba ütköztek az ezzel foglalkozó kutatók.

Zhang et al. különböző mérési eljárásokkal vizsgálták az eszköz termikus transziens választ, így meghatározva a termikus ellenállást. Az egyik esetben sötétben mérték a gerjesztésre adott választ, amikor a napelemet elektromos árammal hajtják meg, másik esetben világosban, azaz amikor az eszközben kialakuló áramért egy fehér LED fényforrás a felelős.

Sötétben mért napelemnél megmérték a napelemet két különböző határfeltétellel (hűtőtönkön és levegőben), és a napelem termikus ellenállását a struktúrafüggvények elválasztási pontjánál állapították meg (azaz addig a pontig tart a napelem a struktúrafüggvényen, amíg a görbék együtt futnak). Különböző fűtőáramokkal hajtva a napelemet megkérdőjelezhetően nagy hőellenállás értékeket kaptak, és a struktúrafüggvényeken bejelölnek egy pontot, ameddig szerintük a napelem tart.

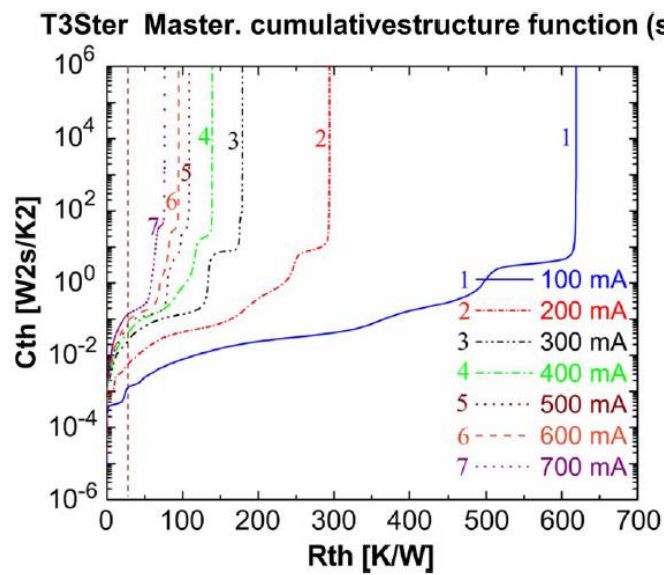
---

<sup>4</sup> Szabó Péter doktori értekezés, Elektrotermikus mikrorendszerek modellezése és karakterizációja. BME 2011. A szerző engedélyével



20. ábra. Napelem hőellenállásának meghatározása a struktúrafüggvények elválási pontjánál [10]

A mérés nincs teljesen reprodukálhatóan leírva, így nem tudjuk pontosan, hogy mi alapján választotta meg a vágási pontot, de feltehetőleg az alapján a mérés alapján, ahol a különböző határfeltételeknek köszönhetően elválás volt a struktúrafüggvényekben. A vágás helye nem lekövethető, hogy mi alapján történt, és hogy használtak-e bármilyen JEDEC szabványt. [6] Termikus tranziens méréseim alapján az értékek megkérdőjelezhetőek, jellegre a függvények hasonlóak, de a hőellenállás értékeik túl nagyok, valószínűleg a környezetet is belemérték a tranziens mérésbe.

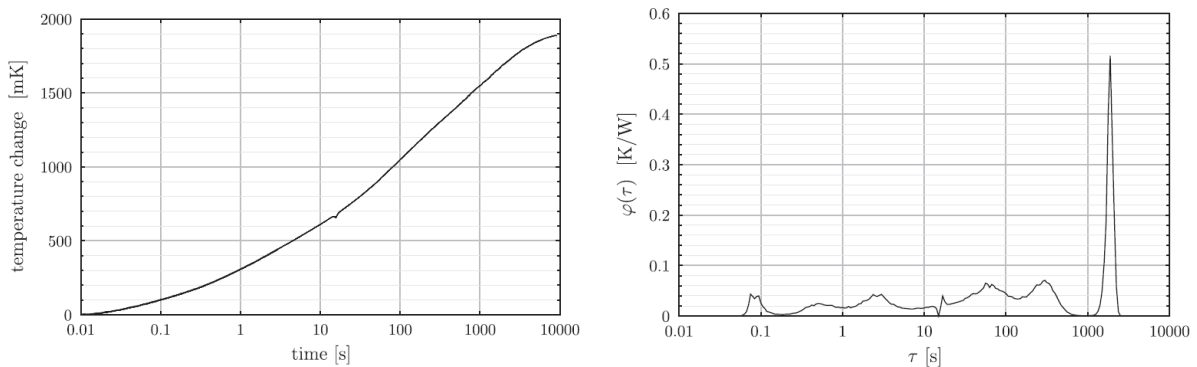


21. ábra. Napelem struktúrafüggvényei különböző fűtőáramok mellett [10]

Megvilágított esetben a napelem, mint egy áramgenerátor működik, és modellezni lehet egy áramgenerátorral sorba kötött diódával, egy párhuzamos és egy soros ellenállással. Ekkor figyelembe kell venni azt, hogy a beeső fény teljesítménye és a napelemből kivehető teljesítmény különbsége lesz az az a teljesítmény, ami melegíteni fogja az eszközt. Mindkét módszer esetében megfigyelték, hogy nagyobb árammal hajtva a napelemet, vagy a fénysugárzás erősségét növelve a termikus ellenállás csökkenni fog. A két mérési eljárással egy nagyságrenddel eltérő eredményeket kaptak, amit Gaitho et al. mérési eredményeivel

magyaráztak, miszerint a szilícium hővezető képessége megváltozik különböző intenzitású megvilágítás, és ezáltal a hőmérsékletváltozás hatására. Ám Gaitho et al. nem ilyen mértékű hővezető képesség változásról írt, és cikkükben sokkal inkább azzal foglalkoztak, hogy vezetőképesség szempontjából van egy optimum, ahol a maximális teljesítményt tudják kinyerni az eszközökből.[11]

Mey et al. szintén azt vizsgálták, hogy lehet-e napelemeken termikus tranzienszt mérni. Eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy annak ellenére figyelembe kell venni a laterális hőterjedést, hogy a napelemek vastagsága sokkal kisebb a laterális kiterjedésüknél, azonban ha tényleg van laterális hőterjedés, akkor a termikus tranziens tranziens kiértékelésének alapját képező egydimenziós analízis nem megfelelő. Elméletük igazolása érdekében egy polikristályos napelem termikus tranziens választ mértek, és az ebből kapott struktúrafüggvényt vizsgálták. A mérést nyugvó levegőben, egy still air chamber-ben végezték, és azt tapasztalták, hogy a napelemet több órán keresztül meghajtva sem érik el az állandósult állapotot, így egy négy órás mérés után egy 1 órás időállandót kaptak. Valószínűleg azért kapták ezeket az eredményeket, mert addig fűtötték a napelemet, amíg a kamrát is elkezdték melegíteni. Az egy órás időállandó feltehetőleg nem a napelem időállandója, hanem a környezeté.

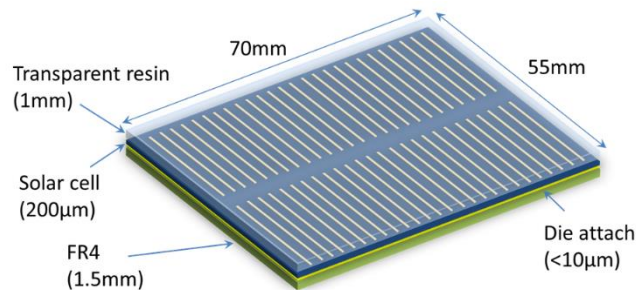


22. ábra. Négy órás mérés válaszfüggvénye és az időállandók [12]

A problémát fénnyel való melegítéssel oldották meg az egyenletes gerjesztéelosztás érdekében, és a cikk szerint így a számolt időállandókat kapták. [12]

Méréseim folyamán egy still air chamber-es elrendezésben hasonló eredményeket kaptam, a mérésről és a probléma kiküszöböléséről részletesen beszámolok a dolgozatomban.

## 4 TERMÍKUS TRANZIENS MÉRÉSEK EGYKRISTÁLYOS SZILÍCIUM NAPELEMEN



23. ábra. A vizsgált egykristályos napelem modul szerkezete

A termikus tranziens mérést T3Ster műszer segítségével végeztem, 20 mA szenzorárammal és különböző fűtőáramokkal. Elsőnek az fűtő- és a szenzorárammal felfűtjük a napelemet, majd lekapcsolva a fűtőáramot ugyanennyi ideig hagyjuk kihűlni, miközben a szenzoráram folyik át rajta. Az átfolyó áramnak köszönhetően lehet mérni a feszültséget, és mivel a feszültség hőmérsékletfüggő ( $U(I, T)$ ), ezért a feszültségváltozásból tudunk következtetni a napelem hőmérsékletének megváltozására. A lehűlés folyamatát leíró görbe lesz a rendszer gerjesztésre adott válasza.

A mérések előtt meghatároztam a napelem modul pontos hőmérsékletfüggését. Ezt T3Ster segítségével, kalibrálással oldottam meg. A kalibrálást 25°C-tól 45°C-ig végeztem 5 fokok lépésekben. A mérést 20°C-ról indítja a termosztát, hogy az első mérési pont is alulról legyen közelítve, azzal a meredekséggel, mint az utána következők. Az eszköz hőmérsékletét akkor tekintjük beálltnak, ha a modul feszültsége 0,3 mV-nál, illetve a termosztát hőmérséklete 120 s-on belül 0.1°C-nál kevesebbet változik. Az eszköz feszültségét 20mA-es szenzoráram mellett mérte a T3Ster. A modul hőmérséklet érzékeny paramétere (temperature sensitive parameter) - 21,99 mV/°C-nak adódott.

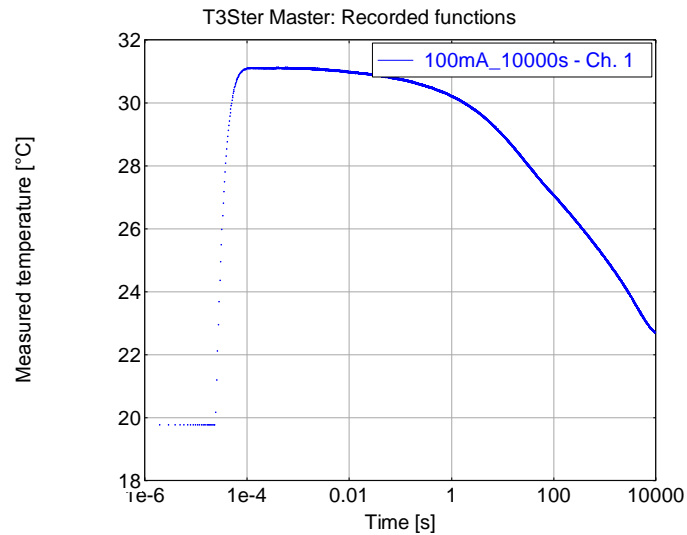
### 4.1 C-SI NAPELEM INTEGRÁLÓ GÖMBBEN

Az egykristályos szilícium napelemet először egy integráló gömbben (optikai mérőberendezés, amellyel fényforrások fényáramát szokás mérni, de számomra az volt a fontos, hogy zárt és fénymentes tér legyen, ahol nincs légáramlás) mértem, így biztosítva a természetes hőáramlást. A napelemet hővezető paszta segítségével hűtőtökhöz (cold plate-CP) rögzítettem, az eszköz cold plate-hez érintkező felületét 25°C-on tartva.

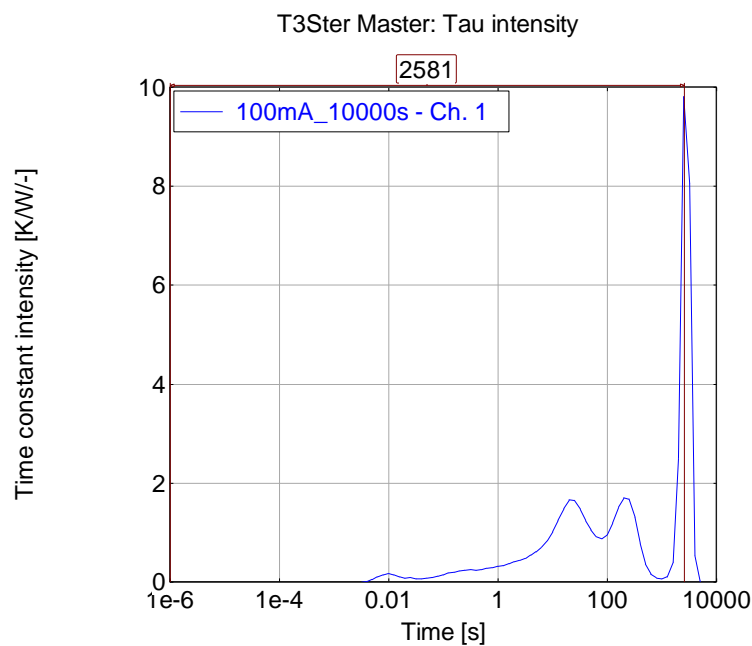
Mint az irodalmi összefoglalóban is említettem, Mey et al. számoltak be arról az eredményről, hogy a napelemet több órán keresztül gerjesztve sem érik el az egyensúlyi állapotot, s nagyon nagy időállandót kaptak a mérés eredményeképpen. A jelenség megfigyelhető az integráló gömbben végzett méréseimnél, ahol 100 mA-es fűtőáramú, 10000 s-ig tartó gerjesztés után sem érte el az eszköz az állandósult állapotot. Mey et al. eredményeikhez hasonlóan, kiértékelve a napelem gerjesztésre adott válaszfüggvényét, majdnem egy órás időállandót kaptam. Egy ekkora méretű napelemnél ez az időállandó túl nagy, a számolt értékektől nagyságrendben eltér, ezért valószínűsíthetően nem a valóságot tükrözi. Azért nem érte el az eszköz az egyensúlyi

állapotot, mert a napelem felmelegedése után már nem csak a napelemet, hanem az integráló gömb belsejét, azaz a környezetet is elkezdtem fűteni és belemérni a válaszfüggvénybe.

Megállapíthatjuk, hogy egy napelem termikus tranziens méréséhez megfelelő nagyságú still air chamber (légmozgás mentes kamra) szükséges, hogy természetes konvekcióval a hőáramlás létrejöhessen, és maga a kamra melege elhanyagolható legyen a mérés ideje alatt, azaz ne mérjük bele a környezetet a válaszfüggvénybe.



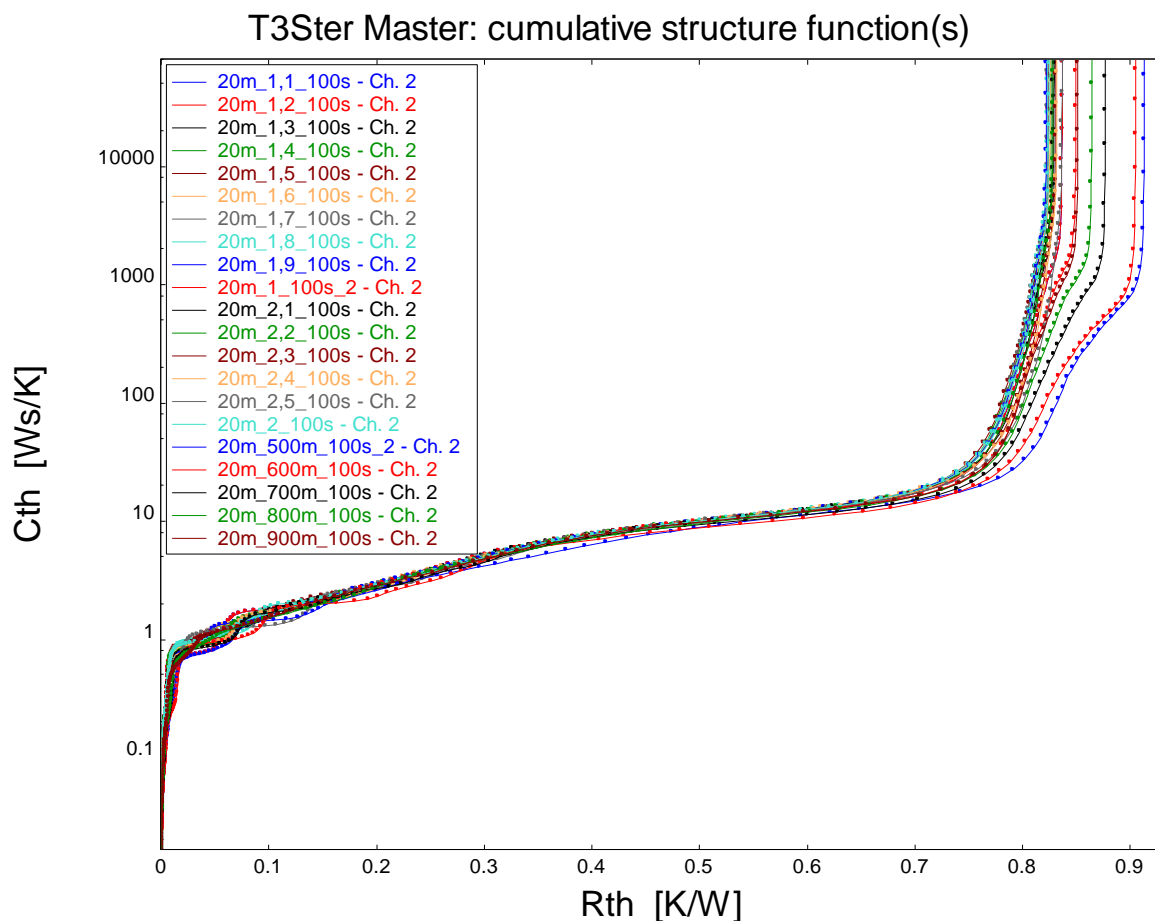
24. ábra. 10000s-os gerjesztés hatására a válaszfüggvény



25. ábra. 10000s-os méréshez tartozó időállandók

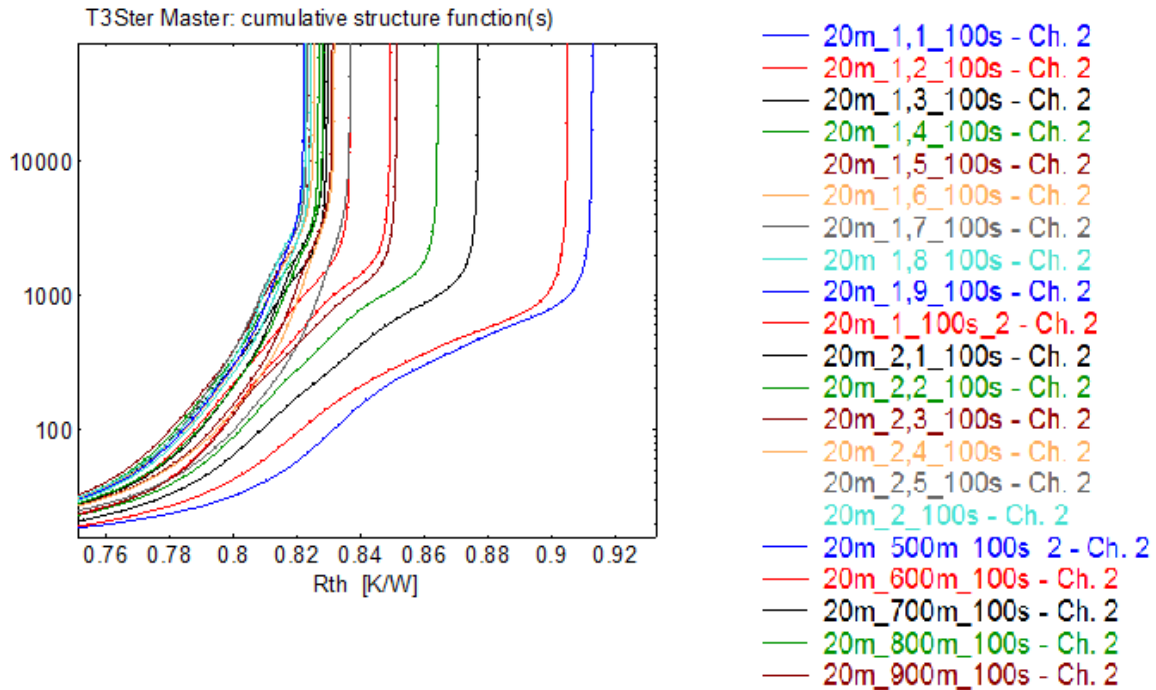
## 4.2 C-SI NAPELEM DCP ELRENDEZÉSBN

Annak kiküszöbölésére, hogy a fenti méréseimhez hasonlóan a napelem környezetének termikus viselkedését is belemérjem a napelem termikus tranziensébe, a napelemet két cold plate közé helyezve mértem, így biztosítva, hogy a napelem mindkét oldalán ugyanaz a határfeltétel legyen, egyik oldalon se valósuljon meg hősugárzás, illetve hőkonvekció, illetve csak elhanyagolható mértékben van jelen. A hűtőtököket  $25^{\circ}\text{C}$ -on tartva végeztem méréseket 20 mA-es szenzoráram és különböző fűtőáramok mellett. Ezzel az elrendezéssel már az elméleti számított értékeket közelítő termikus időállandókat kaptam, illetve a termikus tranziensek is sokkal gyorsabban beálltak. A mérések során különböző fűtőáramokkal kísérleteztem az optimális mérési beállítások eléréséhez. A fűtőáramok értékét 500 mA-tól 2.5 A-ig növelve az az egyes fűtőáramok eltérő struktúrafüggvényeket eredményeztek, annak ellenére, hogy elmélet szerint az összes görbének együtt kellene futnia. (A kumulatív struktúrafüggvény a hővezetési út hőkapacitását ( $C_{TH}$ ) ábrázolja a hőellenállás ( $R_{TH}$ ) függvényében. Azért hívjuk struktúrafüggvénynek, mert az eszközt alkotó egyes rétegek anyagai határozzák meg az adott rétegre jellemző  $R_{TH}$  és a  $C_{TH}$  értéket.)



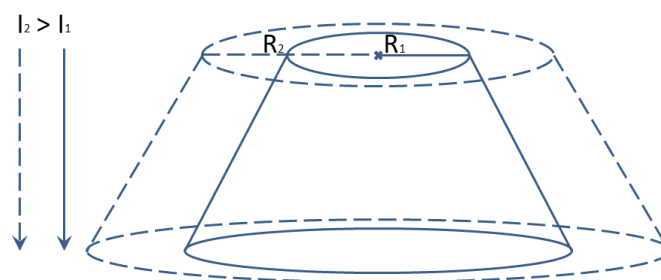
26. ábra. Struktúrafüggvények különböző nagyságú gerjesztések esetén DCP elrendezésben





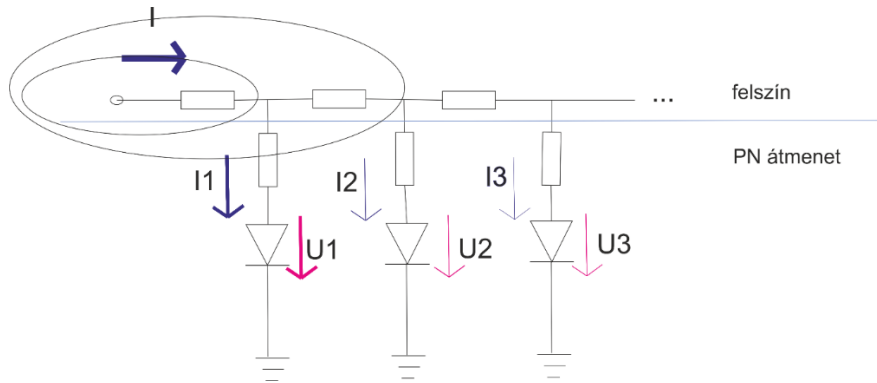
27. ábra. Struktúrafüggvények konvergálása egy adott értékhez növekvő fűtőáramok hatására

Megfigyelhetjük, hogy nagy áramoknál a napelem hőellenállása nem változik, egy adott értékhez konvergálnak, hozzávetőleg 0.82 K/W-hoz. 1.1A feletti áramoknál a hőellenállásbeli eltérés a mérési pontatlanságból adódik. Ezalatt az áramérték alatt megfigyelhetjük azt, hogy nagyobb árammal fűtve a napelemet csökken a hőellenállás. A jelenség az áramkiszorítással magyarázható, miszerint kisebb fűtőáramok esetén az áram nem oszlik el egyenletesen az eszköz felületén, így csak néhány helyen okozva disszipációt. Növelve a fűtőáramot a p-n átmeneten egyre több terület éri el a nyitófeszültségét, egyre nagyobb területet fűtve meg, így növelve a disszipációt. A hűtést hőkúpokként modellezve láthatjuk, hogy nagyobb gerjesztéssel nagyobb térfogatú hőkúpot fűtünk meg.



28. ábra. Nagyobb áram hatására nagyobb térfogatot fűtünk meg

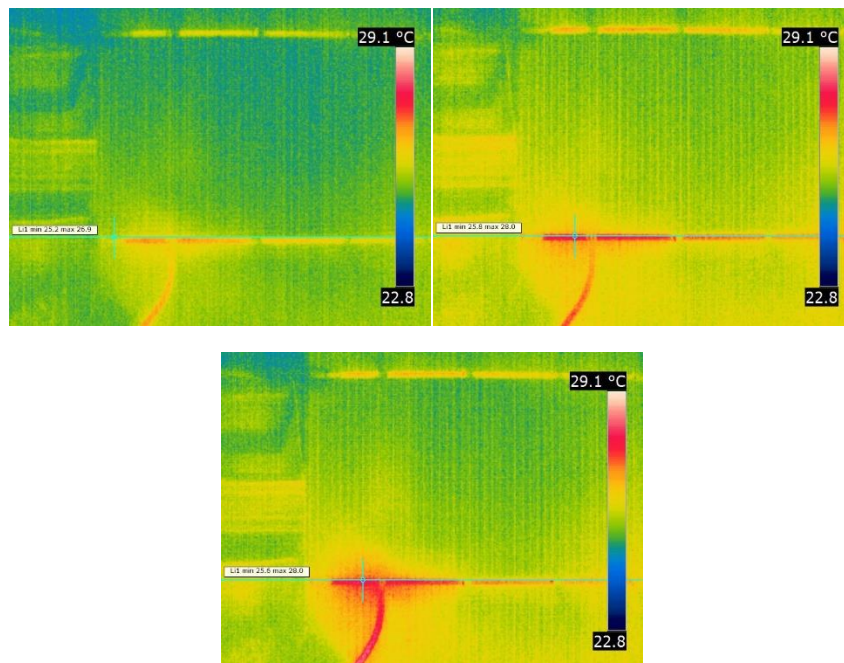
Ez azt jelenti, hogy a megfűtött területnek köszönhetően a hűtő térfogata nagyobb lett, ami a hőellenállás csökkenését eredményezi ( $R_{TH} = \frac{1}{\lambda} \frac{L}{A}$  [K/W], ahol  $\lambda$  a hővezetési együttható,  $c_v$  a fajlagos térfogati hőkapacitás,  $L$  a réteg vastagsága, és  $A$  a megfűtött terület). Ellenállásokkal és diódákkal modellezve értelmezhetjük a kapott eredményt:



29. ábra. Napelem cella felületi soros ellenállásokkal és P-N átmenettel modellezve (ahol  $I > I_1 > I_2 > I_3$  és  $U_1 > U_2 > U_3$  és az ellipszisekkel a csökkenő hőmérsékletű tartományokat szimbolizálom)

A bevezetésnél lévő soros ellenálláson folyik át a legnagyobb áram, itt esik a legnagyobb feszültség, tehát ezen a részen a legnagyobb a teljesítmény és a melegedés. A bevezetéshez közel a p-n átmenetet szimbolizáló ellenálláson és diódán átfolyó áram nagy, a diódán eső feszültség ezért elég ahhoz, hogy kinyisson a dióda. Az exponenciális dióda karakterisztikából tudhatjuk, hogy kicsi feszültségkülönbség nagy áramváltozással jár. Tehát a következő soros ellenálláson eső feszültség, illetve áram is kisebb lesz, aminek köszönhetően a dióda lehet, hogy nem nyit ki. Így vizsgálva a felületet azt mondhatjuk, hogy a napelem cella nem melegszik egyenletesen, a bevezetésekénél a legmelegebb, és azoktól távolodva, a csökkenő áramnak és feszültségnek köszönhetően kevésbé meleg.

A fenti elméleti magyarázat alátámasztása érdekében hőkamerával vizsgáltam egy napelem cellát, különböző gerjesztések mellett.



30. ábra. Napelem celláról készült hőkamerás képek különböző gerjesztések mellett (1,2,3A)

Mint az a 30. ábrán látható, különböző áramokkal fűtve a napelemet a meleg területek (sárga és piros) egyre nagyobb területen jelennek meg, ami arra utal, hogy a fűtött területek kiterjedése

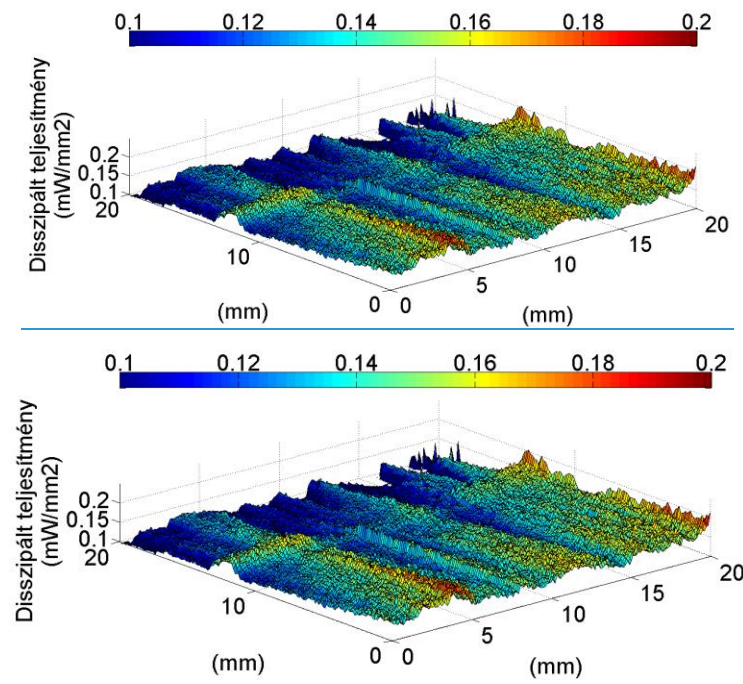
egyre nagyobb. A bevezetésnél melegszik legjobban a napelem, és nem terjed egyenletesen a hő, a bevezetéstől távolodva egyre hidegebb, egyre kisebb teljesítmény disszipálódik.

A magyarázat szemléltetése érdekében, miszerint nagyobb áramokkal nagyobb felületen történik a teljesítmény disszipáció, Kelvin fejes potenciáltérképezést végeztem tokozatlan, egykristályos szilícium napelem cellán. A Kelvin fejes módszer egy érintésmentes, roncsolásmentes mérési eljárás, amelyben egy rezgőkondenzátor segítségével meg tudjuk határozni vezető anyagok kilépési munkáját, illetve felületi feszültséget mérhetünk félvezető és szigetelő anyagokon. A mérés folyamán a napelem felületéhez közel, néhány mm távolságban egy referencia elektróda periodikus mozgása történik, állandó frekvenciával. Az így kialakult rendszerünk lényegében egy kondenzátor, és a kapacitás értékének folyamatos változása miatt váltakozó áram folyik ( $I$ ), melynek értéke

$$I = \left( \frac{\Delta\phi}{e} - U_B \right) \frac{dC}{dt} \quad (4.1)$$

ahol  $U_B$  a felületek közé kapcsolt külső kompenzáló feszültség,  $\Delta\phi$  a kilépési munkák különbsége,  $e$  az elektromos egység töltés.  $U_B$  megfelelő beállításával az áram  $I=0$  A-ré tehető. A kompenzáláshoz szükséges feszültség pontosan a két minta közötti kontaktpotenciál különbségével azonos.[8][9]

A Kelvin fejes méréseket különböző nagyságú fűtőáramok (rövidzár  $I=0$  mA, 100, 200 és 400 mA) mellett végeztem, egy 20 mm x 20 mm-es felületen, 120  $\mu\text{m}$ -es felbontással, egy 100  $\mu\text{m}$ -es átmérőjű grafit mérőelektróda segítségével. A napelem cella egy hűtőtönköz rögzítve 25°C-on volt tartva a termikus hatások kiküszöbölésének érdekében. Ahhoz, hogy a megkapott potenciáltérképeket disszipáció térképekké transzformáljuk, a vizsgált napelem egy 1 mm x 1 mm-es darabkáján I-U karakterisztikát kellett mérni. A gerjesztett napelem potenciáltérképéből ki kell vonni a rövidre zárt állapotban mért potenciál értékeket, és így kapjuk meg a gerjesztéssel létrehozott feszültséget. Az eredményeket a karakterisztika alapján összeszorozzuk az adott feszültséghez tartozó áramsűrűséggel, és így kapjuk a disszipáció térképet, azaz, hogy hol mekkora teljesítmény disszipálódik el (31. ábra).



31. ábra. Disszipáció térkép 200 mA-es (felül) és 400 mA-es (alul) gerjesztés hatására

Látható, hogy 400 mA-rel történő gerjesztésnél az eloszlás sokkal egyenletesebb, nagy disszipációsűrűség figyelhető meg azokon a helyeken, ahol alacsony a disszipációsűrűség 200 mA-es áram esetén. Ez bizonyítja, hogy különböző nagyságú áramok különböző mértékű disszipációeloszlást okoznak nagy kiterjedésű eszközökön. Tehát a különböző áramok által okozott eltérő disszipációsűrűség miatt változások történnek a hőútban, és ezáltal a hőellenállásban.

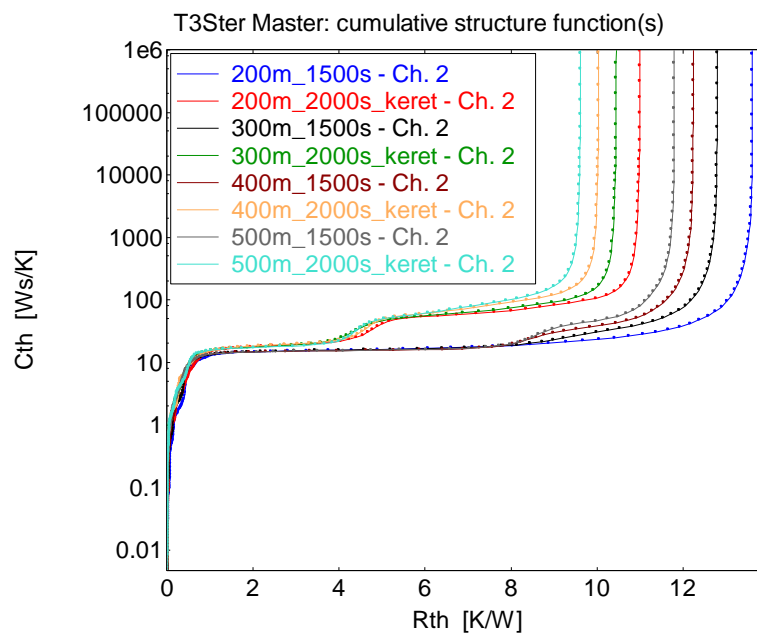
### 4.3 C-SI NAPELEM SZABAD LEVEGŐBEN

Az integráló gömbben tapasztaltak után egy sokkal nagyobb zárt térben, egy zárt szobában, levegőben végeztem méréseket. A napelemet a hozzávezetéseknel felfüggesztettem, így az eszközt minden irányból levegő vette körül, szabadon történhetett a hőáramlás.

A napelem 1500 s-on keresztül tartó gerjesztés során elérte az egyensúlyi állapotot, azaz az integráló gömbben korábban tapasztalt nagy időállandók kellően ismét nem jelentkeztek. Ez a mérési elrendezés továbbá igen jól modellezi a napelemek tényleges üzemi körülményeit, azaz az így meghatározott termikus paraméterek jól használhatók napelemek termikus modellezésében.

A még valóság-közeli felhasználási körülmény kialakítása érdekében készítettem alumínium keretet, amelyet a napelemmodulhoz ragasztottam. Végeztem méréseket a napelemen a kerettel és anélkül. A mérést 20 mA szenzoráram és különböző értékű fűtőáramok mellett végeztem. A keret hűtőbordaként viselkedik, ugyanis megnöveli a hőátadó felületet, és elvonja a napelemtől a hőt. Ezt a rendszert tovább kell melegíteni ahhoz, hogy beálljon az egyensúlyi állapotot, mivel a keretet is fűtjük, de 2000 s-os gerjesztés után beáll az állandósult állapot. A mért eredményeket összehasonlítva láthatjuk, hogy a struktúrafüggvények eleinte együtt futnak,

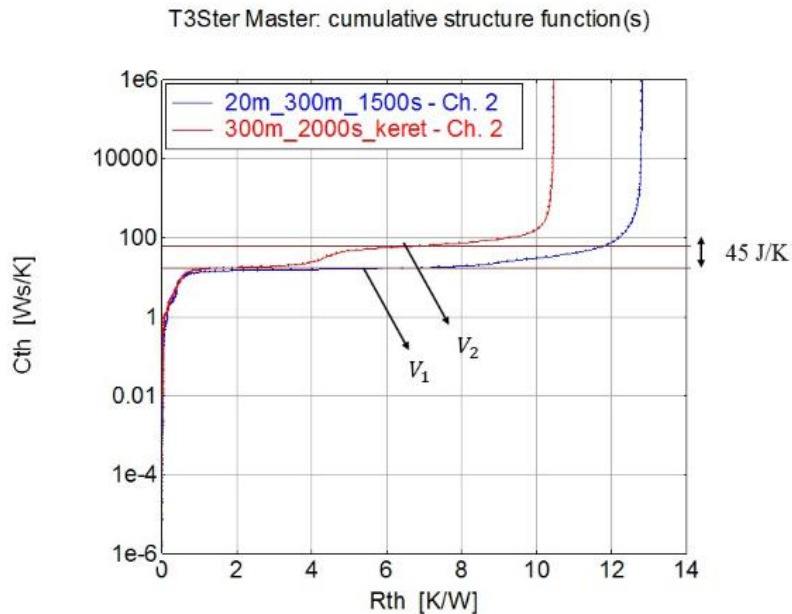
majd körülbelül 4 K/W-nál elválnak és megnövekedik a hőkapacitás értéke azoknál a függvényeknél, ahol a napelemre alumínium keret volt ragasztva, tehát ekkor több hőt kell közölni a rendszerrel ahhoz, hogy a hőmérséklete egy fokkal megemelkedjen, mint keret nélküli társánál. Kerettel történő méréseknél a rendszer hőellenállása lecsökken, ugyanis a hőelvezetésre szolgáló felület megnő, az alumínium hővezetési tényezője jó, és a hővezetés útja is megrövidül, a keret elvezeti a hőt. Ebből levonható az a következtetés, hogy maga a keret is számottevően befolyásolja a napelemek termikus viselkedését, azért mindenképpen azt is figyelembe kell venni a termikus modellezésnél, illetve termikus tranziens mérés esetén a megnövekedett hőkapacitás miatt a keret növeli mérés idejét, ami hosszabb időállandókban jelentkezik. Az így megnövekedett termikus időállandók ismerete főként változékony időjárás esetén adhat pontosabb leírást a napelem termikus viszonyairól.



32. ábra. Napelem struktúrafüggvényei kerettel és anélkül különböző fűtőáramok esetén

Itt is megfigyelhető az áramkiszorítás jelensége, miszerint nagyobb áramú gerjesztés hatására a napelem hőellenállása lecsökken, mivel a fűtött felület megnövekszik ( $R_{TH} = \frac{1}{\lambda A} [K/W]$ ).

A T3Ster-Master nevű programmal (ami a T3Ster-rel mért termikus tranziens válaszok kiértékelését végzi) lehetséges az, hogy az adott réteg anyagának kiválasztása után kiszámolja a réteghez tartozó hőkapacitásból az anyag mennyiségét térfogatban. Mint azt az előbbieken tárgyaltam, a struktúrafüggvények elválási pontjánál a kerettel rendelkező függvény hőkapacitása megnő, tehát a két függvény közötti hőkapacitás különbség értéke fogja meghatározni az alumínium keret térfogatát.



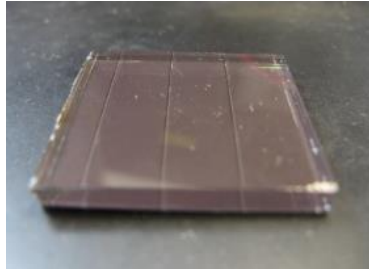
33. ábra. Keret térfogatának meghatározása hőkapacitás különbség segítségével

A program nem tud különbséggel számolni, ezért a  $V_2$  pontban számolt térfogathól ( $20 \text{ cm}^3$ ) ki kell vonni a  $V_1$  pontban számoltat ( $6 \text{ cm}^3$ ), és a különbség adja meg a keret térfogatát, ami így  $14 \text{ cm}^3$ -nek adódott. A kapott eredmény megfelel a valóságnak, ugyanis kézzel számolva a keret térfogatára  $13 \text{ cm}^3$ -t kaptam.

Végeredményképpen megállapíthatjuk, hogy felhasználási körülmények mellett is lehet termikus tranziens méréseket végezni napelemeken, keret nélkül, de akár kerettel rendelkező napelemmodulok 1-2 ezer másodpercig történő gerjesztés hatására elérik az egyensúlyi állapotot. A szabad levegőben történő mérésnek köszönhetően létrejöhetett a természetes konvekció, így nem mértük bele a környezetet a termikus tranziens mérésbe.

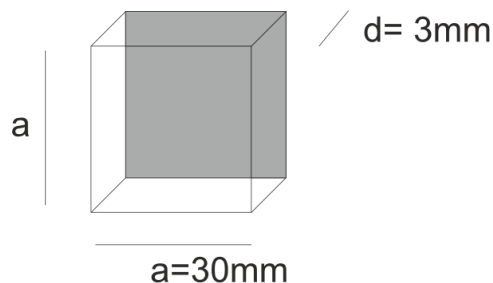
## 5 TERMIKUS TRANZIENS MÉRÉSEK AMORF NAPELEMEN

---



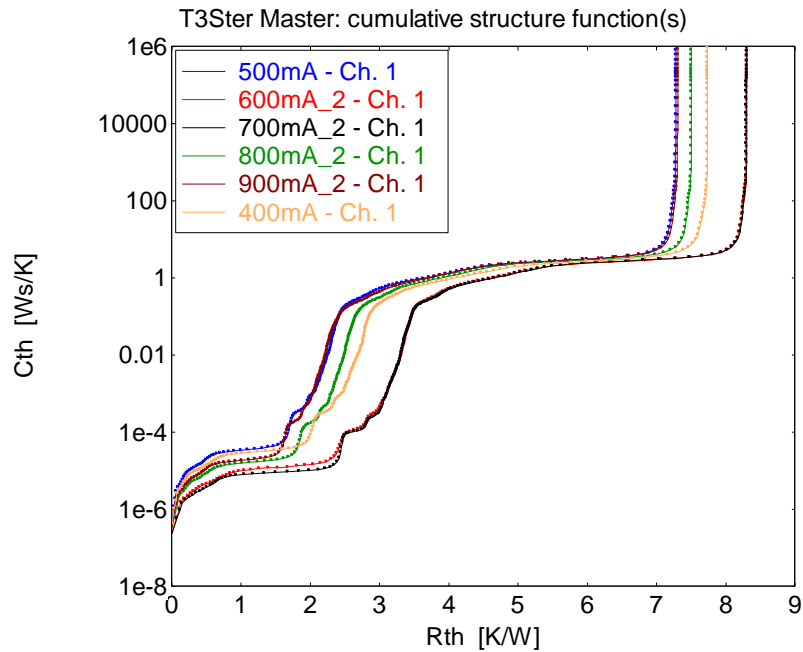
34. ábra. vizsgált amorf napelem modul

Az amorf napelemen is T3Ster mérőműszer segítségével végeztem termikus tranziens méréseket 10 mA szenzorárammal és különböző fűtőáramokkal. Az adott napelem modul pontos hőmérsékletfüggését kalibrálással határoztam meg. A kalibrálást 25°C-tól 55°C-ig végeztem 5 fokos lépésekben. A mérést 20°C-ról indítja a termosztát, hogy az első mérési pont is alulról legyen közelítve, azzal a meredekséggel, mint az utána következők. Az eszköz hőmérsékletét akkor tekintetem beálltnak, ha a modul feszültsége 2 mV-nál, illetve a termosztát hőmérséklete 60s-on belül 0,1°C-nál kevesebbet változik. A mérés folyamán a lehűlést vizsgáljuk, ezért ha a hőmérsékletfüggés -1-szeresével számolunk, akkor az olyan, mintha az eszköz melegedését néznénk.



35. ábra. vizsgált amorf napelem méretei

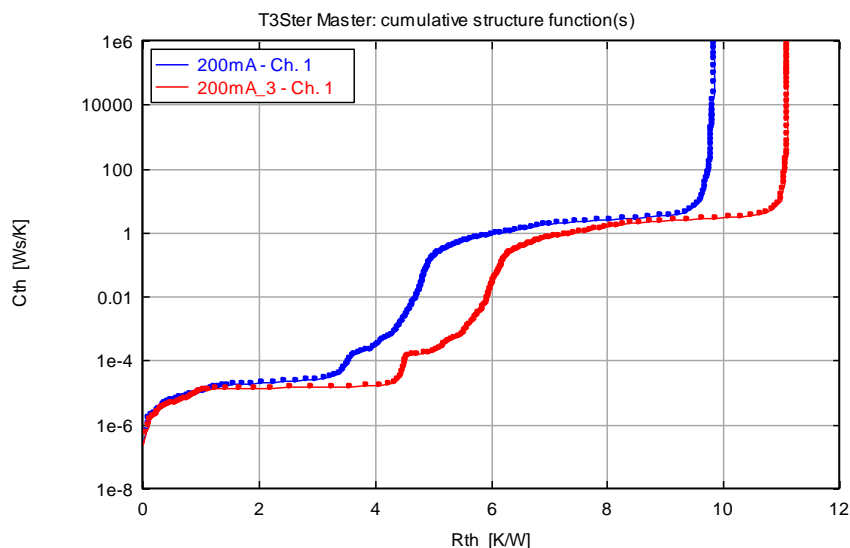
A mérés folyamán a megfelelő hőmérsékletfüggési érték beállítása után a mérőáramot változtatva 400 mA-900 mA-ig a következő struktúrafüggvényeket kaptam:



36. ábra. Amorf napelem struktúrafüggvénye az első meghajtás során különböző fűtőáramok mellett

Az egykristályos napelem méréseinek eredményeivel összehasonlítva láthatjuk, hogy a struktúrafüggvényekben nem figyelhető meg az a szabályszerűség, hogy nagyobb fűtőáram hatására csökken a hőellenállás.

Nagy értékű fűtőárammal való gerjesztés után azt tapasztaltam, hogyha újra elvégzek egy mérést azonos beállítások mellett, akkor eltérő választ, és ezáltal eltérő struktúrafüggvényt kapok.



37. ábra. amorf napelemnél megfigyelhető degradáció (200mA-nagy gerjesztés előtti, 200mA\_3-nagy gerjesztés utáni mérés)



A jelenséget a Staebler-Wronski (Staebler-Wronski effect – SWE) hatással lehet magyarázni, miszerint fénnyel való hosszán tartó megvilágítás esetén a hidrogénnel passzívált amorfszilícium (a-Si:H) tulajdonságai megváltoznak. Tehát például UV fénnyel, vagy a mi esetünkben nagy teljesítménnyel való gerjesztés hatására a passzíváló H atom kötése felbomlik, és a H atom felszabadul, a helyén pedig egy lógó kötés alakul ki. Tehát megnövekedik a rekombinációs centrumok száma, aminek köszönhetően a napelemünk hatásfoka csökken, hőmérséklet érzékeny paramétere és a karakterisztikája is változik.

A struktúrafüggvényen láthatjuk, hogy a két görbe közötti eltérés a görbék elején jelenik meg (2-4 K/W-nál). A görbék változás előtt és után is együtt futnak, ebből arra következtethetünk, hogy a változás egy rétegben, a Si rétegben megy végbe. Ez magyarázható azzal, hogy a nagy teljesítmény miatt létrejövő rekombinációs centrumoknak köszönhetően a szilícium réteg, és a benne kialakított p-i-n dióda tulajdonságai megváltoznak. Láthatjuk, hogy az elsőnek mért, 200 mA-rel fűtött napelemünk  $R_{th}$ -ja kisebb, mint a később mért, ugyanakkora gerjesztést kapó napelemünké. A magasabb tömbi rekombináció miatt valószínűsíthető, hogy a feszültség 10 mA szenzoráram mellett korábban kimért hőmérsékleti együtthatója megváltozott, így látszólag a termikus ellenállás megnőtt, míg a termikus kapacitás számottevően nem változott.

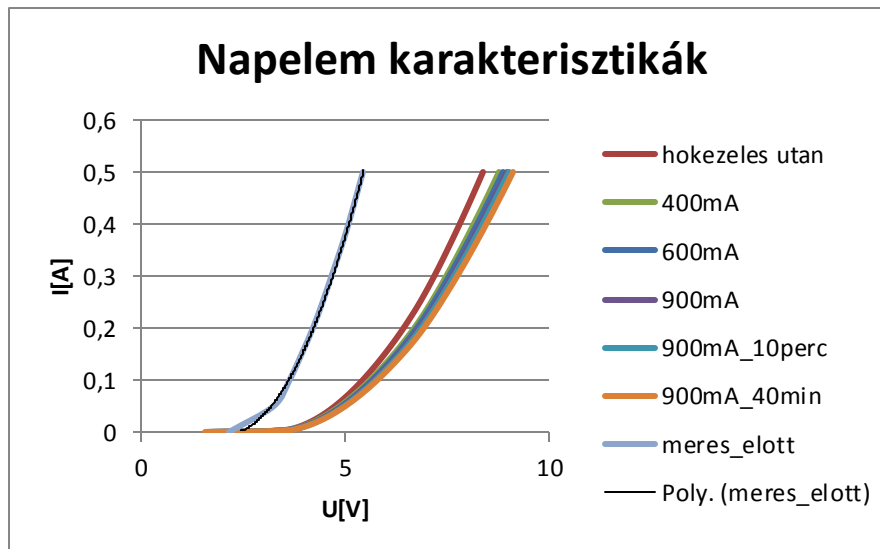
Elméletileg 150°C feletti hőkezelés hatására a jelenség visszafordítható, a hidrogén atomok újra passziválják a lógó kötések, ezért a napelemet 150°C-os hot plate-en, egy óráig hőkezeltém, majd ismételten kalibráltam, azaz TSP-t (temperature sensitive parameter-hőmérséklet érzékeny paraméter) mértem, illetve karakterisztikamérővel karakterisztikákat vettem fel.

A kalibráció során a következő hőmérsékleti együtthatókat kaptam:

	mérés előtt	meghajtás után	hőkezelés után	hőkezelés utáni meghajtás után
TSP[mV/K]	-4,75	-11,32	-8,6284	-11,835

Megfigyelhetjük, hogy a mérés előtti TSP sokat romlik a napelem meghajtása során, több mint a kétszerese lesz. Hőkezelés hatására a degradáció tényleg javítható, néhány lógó kötés újra passziválódik, és az utána következő gerjesztés következtében már nem változik a TSP olyan mértékben, mint a mérés legelején. Ennek az lehet az oka, hogy a degradáció egy olyan jelenség, amely egy idő után beáll egy értékre, és nem romlik tovább a napelem, vagy ha romlik is, csak olyan ütemben, amelyet nagyon hosszú idő alatt tudunk kimérni. Valószínűsíthetően ez fizikailag azt jelentheti, hogy már szinte minden passzíváló hidrogén atom elmozdult, és szabaddá váltak a lógó kötések.

Karakterisztikamérő segítségével a napelem karakterisztikái:

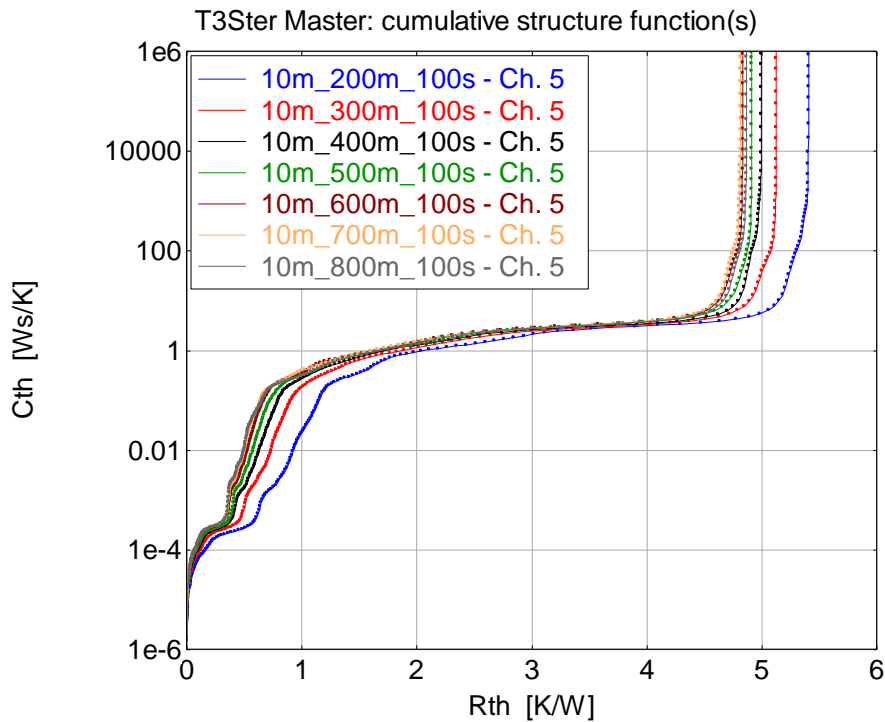


388. ábra. Amorf napelem karakterisztikái

A mérések kezdetekor még nem állt a rendelkezésemre karakterisztikamérő program, így a mérés előtti karakterisztikát táppal és multiméterrel vettem fel, ezért illesztettem arra a görbére egy másodfokú függvényt. A többi karakterisztika a hőkezelés után, különböző áramokkal, különböző ideig történő meghajtás után lett felvéve.

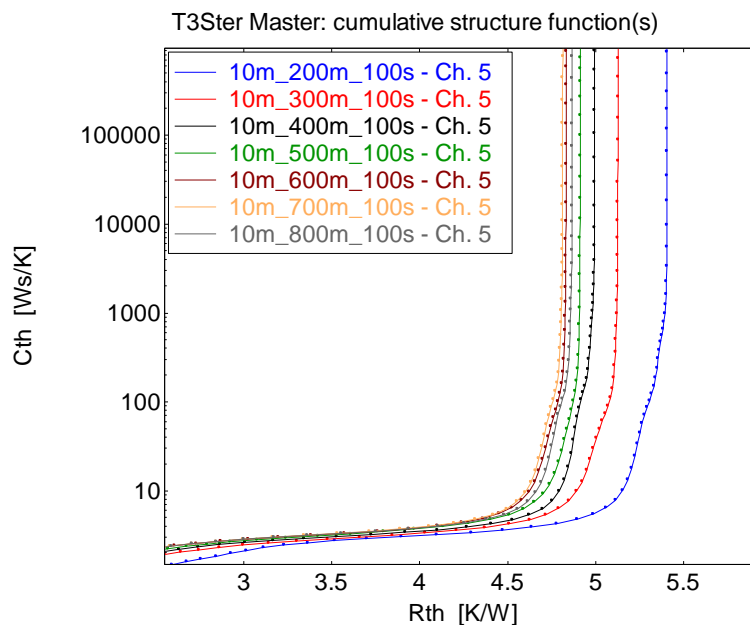
A karakterisztikáknak köszönhetően is megfigyelhetjük azt a jelenséget, hogy a napelemben a szilícium szerkezete sokat változik a kezdetekben, majd elkezd lassulni a folyamat, és a karakterisztikában a változás egyre lelassul, egy érték körül besűrűsödnek a függvények. Ekkor mondhatjuk azt, hogy előregedett annyira az amorf szilícium napelem, hogy méréseket tudunk végezni, mert nincs a mérési idő alatt olyan mértékű változás, ami számottevően beleszólna az eszköz karakterisztikájába.

Miután eléggé előregedettek, azaz beálltnak tekinthettem a napelemet, megismétltem rajta a tranziens méréseket, a fűtőáramot 200 mA-tól 800 mA-ig növelve.



39. ábra. Öregített amorf napelem struktúrafüggvényei különböző fűtőáramok mellett

A struktúrafüggvényeket kinagyítva itt is megfigyelhetjük az egykristályos szilícium napelem mérésénél tapasztaltakat, miszerint nagyobb fűtőáramokkal gerjesztve a napelemet nagyobb felületet fűtünk meg, és ezáltal csökken a hőellenállás. Illetve kellően nagy áramokkal hajtva a napelemet a függvények egy adott hőellenállás értékhez konvergálnak. Valószínűsíthetően 400 mA felett már egyenletesen fűtjük meg a napelemet, egyenletes a disszipáció, így a hőellenállás értéke nem változik. (A látható eltérések a mérés pontatlanságából adódnak.)



39. ábra. Növekvő áram hatására csökkenő hőellenállás, illetve hőellenállás konvergálása egy adott értékhez

Végeredményképpen elmondható, hogy mind egykristályos, mind amorf napelelemnél megfigyelhető a jelenség, miszerint nagyobb áramokkal nagyobb felületet fűtünk meg, így csökkentve a hőellenállást, és elég nagy áramokkal hajtva a napelemet a struktúrafüggvények egy adott hőellenállás értékhez tartanak. A tapasztalat azt mutatja, hogy amorf napelem mérése is lehetséges, csak addig kell hajtani a napelemet, amíg az nem degradálódik annyira, hogy a benne végbemenő változás, degradáció elhanyagolható legyen.

## 6 ÖSSZEFOGLALÁS

---

TDK munkám során termikus tranziens méréseket végeztem különböző típusú napelemmodulokon. Többféle jelenséget figyeltem meg a mérések közben.

Egykristályos szilícium napelemen megfigyeltem, hogy különböző fűtőáramokkal meghajtva a napelemet az eszköz hőellenállása megváltozik, mégpedig növekvő áramok hatására csökken a hőellenállás. Nagyobb áramoknál a struktúrafüggvények a minimum hőellenállás értékhez tartanak, és nem csökkennek tovább.

Hőkamerás vizsgálattal és Kelvin fejes mérésekkel bemutattam, hogy különböző nagyságú áramok eltérő disszipáció sűrűséget hoznak létre a napelem cellán. Kisebb áramoknál a disszipáció mértéke is kisebb, így kisebb felületeken, nem egyenletesen melegszik az eszköz, míg nagyobb áramoknál egyenletesebb a disszipáció. Ezzel magyarázható a struktúrafüggvények megváltozása különböző áramértékeknel, mivel kis áramoknál kis felületet fűtünk meg, míg nagy áramoknál nagy felületet, tehát megváltozik a hőút (nagyobb térfogatot melegítünk), és így a hőellenállás. Kellően nagy áramok esetén már a napelem teljes felületén végbemegy a disszipáció, így egy adott fűtőáram felett a hőellenállás nem csökken tovább, hanem független a fűtőáramtól. Az ilyen áramok mellett mért hőellenállás tekinthető a napelem tényleges hőellenállásának.

Tapasztaltam, hogy kis térfogatú, nyugvó levegőjű kamrában nem lehet termikus tranziens méréseket végezni napelemen, mivel az eszköz mellett a környezetet is fűtjük, majd belemérjük a válaszfüggvénybe. Megoldásként két hűtőtönc között és szabad levegőn is végeztem méréseket, és ezek sikeresek voltak, az eszköz melegítés után elérte az egyensúlyi állapotot. A felhasználási körülményeket modellezve keretbe rögzített napelemet mértem szabad levegőn, ahol azt figyeltem meg, hogy az alumínium keret hűtőbordaként viselkedik. Két hűtőtönc közé elhelyezett napelemet vizsgálva az előbb tárgyalt jelenséget tapasztaltam, hogy növekvő fűtőáramok csökkenő hőellenállást okoznak, majd egy bizonyos áramérték felett beállnak, a minimális értékű hőellenálláshoz tartanak. A napelemet két hűtőtönckel két oldalról hűtve szintén megakadályozható a környezet melegítéséből adódó nagy termikus időállandók megjelenése.

Amorf szilícium napelemet vizsgálva megfigyeltem, hogy az amorf napelemekre jellemző Staebler-Wronski hatás (degradációt) befolyásolja a napelemeken végzett termikus tranziens mérések eredményeit. Megmutattam kalibráció (hőmérséklet érzékeny paraméter méréssel), és karakterisztika készítésével, hogy mérés közben változik a napelem. Előregedés után az eszköz TSP-je és karakterisztikája nem változik számottevően, ekkor tudtam megbízható és reprodukálható termikus tranziens méréseket végezni rajta. Ekkor ugyanazt a jelenséget figyeltem meg, mint egykristályos szilícium napelem esetében, hogy nagyobb fűtőáramok esetén csökken a hőellenállás, majd egy adott áramérték felett nem változik tovább. Tehát amorf szilícium alapú napelemeken akkor lehet termikus tranziens méréseket végezni, amikor az eszköz már kellően előregedett ahhoz, hogy ne változzanak számottevően a hőmérséklet mérésre szolgáló p-n átmenet paraméterei.

## 7 IRODALOMJEGYZÉK

---

- [1] Dr. Mizsei János: „Napelemek”, kézirat, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest, 2003
- [2] Armin Räuber: „Napelem technológiák és jellemzőik”, SOLTRAIN – G04 előadás, fordította SziE, SziE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék, Gödöllő, 2002
- [3] Mikolasek Miroslav: „Current status and progress in the new generation’s silicon based solar cells”, 2009, <http://www.posterus.sk/?p=1247>, hozzáférés dátuma: 2014. október 1.
- [4] Christiana Honsberg, Stuart Bowden: PVCDROM, <http://pvcdrom.pveducation.org/MANUFACT/A-SI.HTM>, hozzáférés dátuma: 2014. október 1.
- [5] Mat Dirjish: „What’s the Difference between Thin Film and Crystalline Silicon Solar Panels”, Electronic Design, 2012
- [6] JEDEC Standard, JESD51-14, „Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-to-Case”, November 2010, Annex A,B,C pp. 19-35
- [7] V. Székely, M. Rencz: „Thermal Dynamics and the Time Constant Domain”, IEEE Transactions On Components and Packaging Technologies, Vol. 23, No. 3, pp. 687-594, 2000
- [8] Dieter K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization John Wiley & Sons, Feb 10, 2006, pp. 526-533
- [9] D.K. Shroder: Surface voltage and surface photovoltage: history, theory and applications, Measurement Science & Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 16-31, 2000
- [10] Jihong Zhang, Yulin Gao, Yijun Lu, Lihong Zhu, Ziquan Guo, Guolong Chen, and Zhong Chen: „Transient Thermal Resistance Test of Single-Crystal-Silicon Solar Cell”, IEEE Trans on Electron Devices, Vol. 59. No. 9, 2012
- [11] F. Gaitho, F. Ndiritu, P. Muriithi, R. Ngumbu és J. Ngareh: „Effect of thermal conductivity on the efficiency of single crystal silicon solar cell coated with an anti-reflective thin film”, Solar Energy, Vol. 83, No. 8., pp. 1115-1423, 2009
- [12] G. D. Mey, J. Wyrzutowicz, A. D. Vos, W. Maranda és A. Naipieralski: „Influence of lateral heat diffusion on the thermal impedance measurement of photovoltaic panels”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 112, pp. 1-5, 2013