



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR  
ELEKTRONIKAI ÉS KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZEREK INTÉZET  
MŰSZERTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK



# SZAKDOLGOZAT



OE-KVK  
2023.

**Tóth Ádám**  
T009488/FI12904/K



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem  
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar  
Műszertechnikai és Automatizálási Intézet

## SAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Tóth Ádám

Szaktervezési száma: SZD2309040923424368

Törzskönyvi száma: T009488/FI12904/K

Neptun kódja:

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)

Specializáció: Műszer-automatika specializáció

A dolgozat címe: Komplex szilícium vizsgálata fotovoltikus cellához

A dolgozat címe angolul: Examination of complex silicon for photovoltaic cell

A feladat részletezése: A fotovoltikus cella előzetes termékénél alkalmazott mérési technológiák bemutatása és megvalósítása, valamint mérési eredmények kiértékelése.

Intézményi konzulens neve: Papp József Péter

Külső konzulens neve: Bándli Gyula

Munkahelye: Semilab Zrt.

A kiadott téma elévülési határideje: 2025. 12. 31.

Beadási határidő: 2023. 12. 15.

A szaktervezési feladatot: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2023. 11. 07.

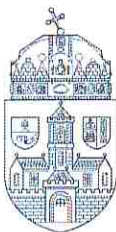


Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR  
ELEKTRONIKAI ÉS KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZEREK INTÉZETI  
MŰSZERTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK



## HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

Budapest, 20. 23. 12. 06......

  
.....  
hallgató aláírása

## **Köszönetnyilvánítás**

Mindenekelőtt szeretném kifejezni a köszönetemet a konzulensemnek Papp Jó-zsefnek, aki tapasztalataival és szakmai tudásával célravezető javaslatokkal látott el a szakdolgozatom elkészítése során.

Köszönöm az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar tanárainak, akik a tanulmányaim alatt a tudásukat megosztva segítették a munkámat.

Szeretném megköszönni a Semilab Zrt.-nek, hogy lehetőséget biztosítottak a megfelelő téma kiválasztásához. Külön köszönet kollégaimnak Bándli Gyulának és Borbély Mártonnak, akik műszaki és szakmai tudásokkal számtalanszor segítettek a dolgozatom elkészítése során.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni a családomnak, barátnőmnek és barátaimnak, akik támogattak és mellettem álltak az évek alatt.

## Tartalomjegyzék

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés .....                                                              | 7  |
| 2. Feladat és probléma megfogalmazása .....                                     | 9  |
| 3. Fotovoltaikus cella.....                                                     | 10 |
| 3.1. Polikristályos napelem .....                                               | 10 |
| 3.2. Monokristályos napelem .....                                               | 11 |
| 3.3. Fotovoltaikus cella működése .....                                         | 12 |
| 4. Fotovoltaikus cella előállítási folyamata és vizsgálata .....                | 13 |
| 4.1. Tiszta szilícium előállítása .....                                         | 13 |
| 4.2. Ingot létrehozása és vizsgálata .....                                      | 14 |
| 4.3. Blokk létrehozása és vizsgálata.....                                       | 15 |
| 4.4. Szilícium wafer létrehozása és vizsgálata .....                            | 16 |
| 4.5. Fotovoltaikus cella létrehozása és vizsgálata .....                        | 17 |
| 5. Blokk tesztelő mérőberendezés .....                                          | 20 |
| 5.1. Alapvető tulajdonságai.....                                                | 20 |
| 5.2. Mérés ismertetése.....                                                     | 21 |
| 5.3. Vezérlőszoftver .....                                                      | 23 |
| 5.4. Biztonsági megoldások .....                                                | 24 |
| 6. Blokk súlymérés, magasságmérés .....                                         | 26 |
| 7. Eddy árammal történő ellenállásmérés .....                                   | 28 |
| 7.1. Működési elve .....                                                        | 28 |
| 7.2. Fontosabb befolyásoló tulajdonságok .....                                  | 29 |
| 7.3. Eddy-Probe kalibrációja és a mérési eredmény kiértékelése .....            | 30 |
| 8. PN vezetőképesség vizsgálata .....                                           | 33 |
| 9. Transzmissziós képalkotás .....                                              | 35 |
| 9.1. Mérés ismertetése.....                                                     | 35 |
| 9.2. Infravörös fényforrás felépítése .....                                     | 36 |
| 9.3. Kamera felépítése és fontosabb tulajdonságai .....                         | 38 |
| 9.4. Fontosabb beállítások és a mérési eredmények kiértékelése .....            | 40 |
| 10. Fotolumineszcenciás képalkotás és töltéshordozók élettartamának mérése..... | 45 |
| 10.1. Fotolumineszcencia és fajtái .....                                        | 45 |
| 10.2. Fotolumineszcenciás képalkotás mérésének bemutatása .....                 | 46 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10.2.1. Szükséges fejlesztések .....                                                   | 46 |
| 10.2.2. Technológiai elemek ismertetése .....                                          | 47 |
| 10.2.3. Méréshez szükséges beállítások.....                                            | 51 |
| 10.3. Kisebbség töltéshordozók élettartamának vizsgálata $\mu$ -PCD segítségével ..... | 56 |
| 10.3.1. Mérés ismertetése.....                                                         | 56 |
| 10.4. Mérési eredmények kiértékelése .....                                             | 57 |
| 11. Fejlesztési lehetőségek .....                                                      | 60 |
| 12. Összefoglaló .....                                                                 | 61 |
| 13. Summary .....                                                                      | 62 |
| Ábrajegyzék .....                                                                      | 63 |
| Hivatkozásjegyzék .....                                                                | 65 |

## 1. Bevezetés

Manapság, ha azt halljuk, hogy megújuló energiaforrás, akkor az emberek többségének a napelem jut az eszébe. Nem csak Magyarországon, de világszerte is egyre nagyobb igény van a napelemekre. Egyre több házon, közintézményen van napelem, valamint közterületeken is egyre gyakrabban lehet látni lámpákat napelemmel ellátva, ezzel is csökkentve a kiadásokat. A nagyobb vállalatok többsége is igényt tart ezekre. Nemcsak épületekre szerelhetők napelemek, hanem akár gépjárművek tetőszerkezetébe is beépíthető. Ugyanakkor kisebb elektronikai eszközökben is egyre sűrűbben fordulnak elő, mint például számológépekben, karórákban vagy külső akkumulátorokban. Ugyanakkor ezeknek a teljesítménye közel sem akkora, mint a háztetőkre kerülő típusoké.

Szakdolgozatom során alkalmazott vizsgálatokat a Semilab Zrt. budapesti telephelyén található PV csarnokban végeztem el, ahol a napelemgyártáshoz elengedhetetlen teszt- és mérőberendezések beállításának utolsó fázisa történik, a gépek tesztelése. A cég magyar tulajdonú, de több mint 1500 alkalmazottal van jelen 8 országban a felvezető-/napelem-/kijelzőipar piacán. [36] Magyarországon jelenleg két telephelye van Budapesten és Szegeden, a kettő közül az előbbi a cégnek a központja, a fejlesztések jelentős részét is itt végzik, amelyekkel berobbantak a fent említett iparágakba.

A cég olyan mérőberendezéseket gyárt, illetve fejleszt, amelyek főleg optikai és elektromos mérési technológiákon alapulnak. Ezeket a berendezéseket világszerte használják az új iparági megoldások kutatására, fejlesztésére, illetve gyártási folyamatok különböző lépéseinek ellenőrzésére. A Semilab mindenféle vevői igény esetén automatizálási és egyéb fejlesztési megvalósítások széles skáláját kínálja a kézi működtetéstől a teljes automatizálásig. A legnagyobb kijelző-, memória-, chip-, illetve napelemgyártóknak készít termékeket. Nagy hangsúlyt fektetnek, hogy a vevők igényeit 100 %-ban kielégítsék és olyan terméket hozzanak létre, amely hatékonyabb gyártást és ellenőrzést eredményez, miközben a lehető legmagasabb szintű felhasználói élményt garantálják. [36], [37]

A PV csarnokban többnyire a napelemiparban a különböző gyártási folyamatokban használatos mérőberendezések vannak jelen. A feladatom a mérőberendezések egyes részeinek a beépítése és beállítása szoftveresen, valamint hardveresen. Egyúttal ezeknek a tesztelése, esetleges hiba esetén a hiba forrásának feltárása és hiba kijavítása.

Szakdolgozatom során ismertetem a napelemiparban használatos fotovoltaiikus cellák főbb típusit és előállításuk folyamatát. A szakdolgozatom fókuszában az egyik gyártási résznél alkalmazott mérőberendezés áll, amely a vizsgálandó minták méretnöveleése céljából lényeges fejlesztéseket igényelt. Valamint kitérek a napelemiparban használt fotovoltaiikus cella típusaira és vizsgálataira. A későbbiekben leírom a mérőgép által alkalmazott egyes vizsgálatokat, ezeknek a működését, némelyik esetben a felépítését, illetve a mérés végeztével kapott eredmények kiértékelését. A mérések során több különböző mintával dolgoztam, amelyeket a munkám során dokumentáltam. Ezért az egyes fejezeteknél a kapott eredmények között nem feltétlenül lesz összefüggés. Továbbá szó esik még a fontosabb változtatásokat igénylő mérőegységeknél fellépő hibákról és megoldásokról.

## 2. Feladat és probléma megfogalmazása

A napelemiparban fontos az egyes gyártási folyamatok során a termékek vizsgálata a minőség és az anyag egyéb tulajdonságai alapján. Különösen fontosak ezek az ellenőrzések a blokk előállítási folyamata után. Ugyanis fontos minél előbb a hibákat észrevenni mielőtt a tömbök szeletelésére kerülne sor, mert a belső repedések és hibák miatt a már felszeletelt wafer könnyebben eltörne és a fűrész is károsíthatja, ezzel jelentős idővesztéseket okozva. A Semilab minden gyártási fázisban lévő termékei minőségellenőrzésére mérőberendezéseket fejleszt és gyárt.

A legyártott és összeszerelt gépeket előkészítik és érintésvédelmi szempontból bevizsgálják, ezzel biztosítva az emberek és az eszközök védelmét. Ezt követi a tesztelés, kiszállítás, telepítés, elfogadás és támogatás, ezeket a szerviz csoport végzi, hozzájuk csatlakoztam én is. Fő feladatunk a mérőeszközök beállítása és kalibrációja majd a kiszállítás előtti tesztek elvégzése.

Szakdolgozatomban egy korábban kiszállított berendezés továbbfejlesztését fogom részletezni, a vevői elvárás nagyobb méretű minták vizsgálata volt. A feladatom a cserélendő vagy fejlesztendő alkatrészek meghatározása, beállítása, kalibrációja, valamint a beépítése volt. Ezeknek a beállításoknak az elvégzésére részletes kapcsolási rajzok, olykor leírások álltak rendelkezésemre. Azonban a mérések során különféle hibákba ütközhetünk, ez lehet szoftveres (ha a vizsgálat során az egyes mérőeszközök paraméterei nem megfelelően van beállítva), illetve lehet hardveres hiba is (ezek leginkább elkötések során szoktak bekövetkezni). Az ilyen hibák lényeges késleltető tényezők lehetnek később a beállítás során, a hibás bekötések a mérőkészülékekben is kárt okozhatnak. Ezért fontos az ismétlődő hibák megelőzése, hogy az esetleges bekövetkezendő károkat elkerüljük, de ez nem minden esetben lehetséges. A szoftverből, illetve a beállításból eredő hibák mielőbbi felfedezést és javítást igényelnek. Általában egy ilyen mérőberendezés teljes beállítása 2 hetet is igényelhet, de a változtatások és új elemek tanulmányozása miatt tovább tartott a működésképes állapotba hozása.

Az elvégzett mérőeszközök beállítását, illetve kalibrációját a dolgozatomban elkészítése során folyamatos jegyzetekkel, képekkel és ábrákkal dokumentáltam, illetve az esetleges fellépő hibákat javítottam.

### 3. Fotovoltaikus cella

A fotovoltaikus cella egy olyan elektronikai eszköz, amely a napfényt elektromos árammá képes átalakítani. A napelemiparban leginkább egy kristálytípusú fotovoltaikus cellákat használnak, ugyanis eddig ezeknél érték el a legjobb hatásfokot és ezt a legegyszerűbb előállítani. Vannak azonban más vékonyrétegű cellák és több másféle típusok, ugyanis ahogy a technológia változik és fejlődik úgy fejlesztenek ki ezzel együtt új termékeket. De sajnos ezeknek a mérése és elemzése nem megy annyira gördülékenyen és hatékonyan, mint a kristályos típusú cellák esetében. A kristályos fotovoltaikus cellák típusait alapvetően két nagy csoportra lehet osztani, lehetnek monokristályos és polikristályos cellák. Elsősorban ezeket szeretném összehasonlítani, hogy melyik a gazdaságosabb, illetve hatékonyabb a két típus közül. [5], [39]

#### 3.1. Polikristályos napelem

A polikristályos napelemek és a monokristályos napelemek között elsősorban az előállítási eljárásban rejlik a legnagyobb különbsége. A polikristályos napelemek előállításának a lényege, hogy az olvasztott szilíciumot egy téglatest alakú öntvénykádba öntik, majd a kihűlése során multikristályban dermed meg. Később téglalap alakú bugát négyzet alakú hasábokra, tömbökre felszeletelik. A szeletelés során azonban több cella is eltörhet, ugyanis többkristályos szilíciumból épül fel, ezzel veszteséget generálva. Mivelhogy az eltört szeleteket már nem tudják felhasználni. Ilyenkor ezeket újra megolvasztják, majd ugyanígy öntik újra. [6]

A polikristályos napelemeknél a zárványok az emberi szemnek is feltűnőek. Ez megfigyelhető a 1. ábrán.



1. ábra Polikristályos szilícium wafer és szilícium blokk (saját készítésű kép)

Heterogén tulajdonság jellemzi, ezáltal a vizsgálat során kevésbé pontosabban lehet megállapítani néhány fontosabb tulajdonságát. Egy elkészült panel teljesítménye körülbelül 260-280W az átlagos élettartama körülbelül 25-30 év, de ezen értékek pontos meghatározása gyártónként változhat. A hatásfoka körülbelül 13-18%-on belül esik, ennél manapság már vannak nagyobb hatásfokú napaelemek is. [7] Előállítás viszonylag olcsó, ezáltal a napelem panel is kedvezőbb áron megvásárolható. A teljesítményét tekintve elég jó értékeket mutat borús, felhős idő esetén, azonban magas hőmérsékletnél a teljesítménye visszaesik. Tájolás szempontjából nem annyira jelentős a pontos bemérése és elhelyezése, ugyanis nem annyira érzékeny a napfény beeső dőlésszögére, ez a telepítés szempontjából is előnyös lehet. [9]

### **3.2. Monokristályos napelem**

Ahogy korábban már említettem a legnagyobb eltérés a polikristályos napelemek-től a gyártásban van, ugyanis itt nem egy öntvénybe öntik az olvadt szilíciumot, hanem úgynevezett CZ-módszerrel állítják elő a szilícium tömböket, amely lényegében egykristály növesztési eljárás. A készítés során ennél a típusnál a szilícium atomjai szabályszerűen geometriai alakzatba rendeződnek, ezért kevesebb az esélye arra, hogy eltörik. Ez előnyt jelenthet később a mérés és a végleges cella létrehozásában, ugyanis kevésbé lesz törékeny a minta. [6]

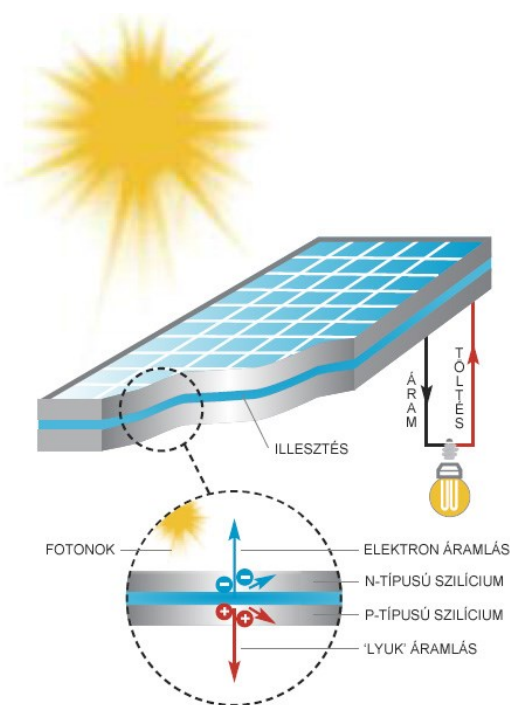
Ennél a fotovoltaiikus cella típusnál már inkább tekinthető homogénnek, mert csak egy féle szilíciumból állítják elő, azonban ez se lesz teljesen az elvártnak megfelelő, ugyanis a különböző adalékolások miatt nem lehet egyenletes eloszlást biztosítani, ilyen az n- és p-típusú adalékolás esetén. Viszont ezeknek a mérése már sokkal pontosabban meghatározható, mint a polikristályos napelemek esetén. Egy összeépített panel teljesítménye körülbelül 345-375W, az átlagos élettartama ugyanúgy, mint a polikristályos cellák esetén körülbelül 25-30 év. A hatásfoka tipikusan 18-25% közé esik, ami lényegesen jobb az előzőnél. Tehát a monokristályos cella jobban teljesít átlagosan körülbelül 30%-kal a polikristályos fotovoltaiikus cellával szemben. [8] Hátránya leginkább az előállítási költségekben mutatkozik meg. A tájolás szempontjából sokkal érzékenyebb, nem kezeli jól a szórt fényt ezzel együtt borús időben a teljesítménye visszaesik. Ugyanakkor magas hőmérsékletre már jobban reagál, viszont a teljesítménye még így is visszaesik. [7], [10]

### 3.3. Fotovoltaikus cella működése

A világító fény hatására a cella áramot és feszültséget is termel, így képes előállítani az elektromos energiát.

Ahhoz, hogy ez a folyamat megvalósuljon, elsősorban egy olyan anyagra van szükség, amely a fény elnyelésével egy elektront magasabb energiaállapotba juttat, továbbá biztosítani kell a mozgását annak, hogy ez a magasabb energiájú elektront a napelemből egy külső áramkörbe jusson. Ez az elektron az energiáját eloszlatja a külső áramkörben és visszatér a napelembe (2. ábra). [39]

A fotovoltaikus energiaátalakításra vonatkozó követelményeket potenciálisan többféle anyag és eljárás is teljesítheti, de a gyakorlatban szinte minden fotovoltaikus energiaátalakításhoz p-n átmenet formájában félvezető anyagokat, ezen belül is a szilíciumot használják. [3]



2. ábra Napelem működése [4]

A napelem működésének alapvető lépései a következők:

1. Fény által generált hordozók létrehozása.
2. A fény által generált hordozók összegyűjtése áramot generál.
3. Nagy feszültség generálása a napelemen.
4. Teljesítmény disszipációja a terhelésben. [3]

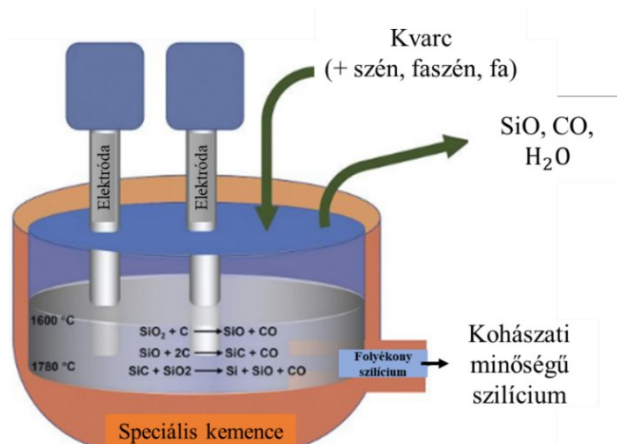
## 4. Fotovoltaikus cella előállítási folyamata és vizsgálata

Az előző fejezetben már szó esett arról, hogy az napelemcelláknál az előállításban rejlenek a fő különbségek. Ebben a fejezetben szeretnék kitérni részletesen a monokristályos napelem előállítására miképp lesz a nyers anyagból energiatermelésre alkalmas napelem panel. Valamint miért fontos minden lépésnél a termék folyamatos ellenőrzése.

### 4.1. Tiszta szilícium előállítása

Mint ahogy az eddigiekben kiderült a napelemipar fő alapanyaga a szilícium azonban ezt tiszta formájában nem lehet elérni. A kvarcban levő szilícium-dioxid ( $\text{SiO}_2$ ) tisztításával nyerik ki, amely a legnagyobb előfordulásban lévő ásványi anyag a Földön. [12]

Elsősorban el kell távolítani a felesleges oxigént a szilícium-dioxidból, amit úgy lehet elérni, hogy a zúzott kvarcot beleteszik egy speciális kemencébe, amely körülbelül  $1700^\circ\text{C}$ -ra melegítenek fel, majd szén elektróda segítségével egy magas hőmérsékletű elektromos ívet hoznak létre, amely során létrejön az olvadt szilícium és a szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ), mint melléktermék, ennek a folyamatnak a neve röviden CAW (carbon arc welding) (3. ábra). Az így kapott tiszta szilícium 99%-os tisztaságú, azonban ez még mindig nem elég, ugyanis, ha már ennyivel vége lenne a folyamatnak akkor közel se lehetni olyan teljesítményű napelemeket előállítani, amelyek hasznosnak bizonyulnának az energiatermelés szempontjából. [13] Következésképp további hasonló finomítást igénylő folyamatra van szükség, hogy a felesleges szennyezéseket eltávolítsák és elérhető legyen a megfelelő tisztaság, ami a fotovoltaikus cella esetén 9N az elfogadott érték, vagyis 99,9999999%-os tisztaságú. [14]



3. ábra Tiszta szilícium előállítása kvarcból [11]

## 4.2. Ingot létrehozása és vizsgálata

A következő lépésben a szilícium tömbök létrehozása a cél, ezt a leghatékonyabban és legtakarékosabban a CZ-módszerrel (Czochralski) lehet végrehajtani.

A folyamat során a már elkészült tiszta szilíciumot egy olvasztótégelybe rakják és a kemence falán történő induktív melegítés hatására újra megolvad. Itt már a megfelelő tudatos szennyezéssel eléri a kívánt p- vagy n-típusú (bór vagy foszfor) szilíciumot, amely az elektromos vezetőképesség szempontjából lényeges. Ezt követően az öntvénybe mártanak egy úgynevezett monokristályos seed-et és meghatározott sebességgel húzzák ki az olvadékból, miközben a seed és az olvasztótégely adott sebességgel forog, így folyamatosan növekszik a henger formájú kristály. Végezetül létrejön a szilícium ingot, ezt lentebb a 4. ábrán látható a seed-el együtt. Ezt folyamatot nevezik egykristály növesztésnek. [1]



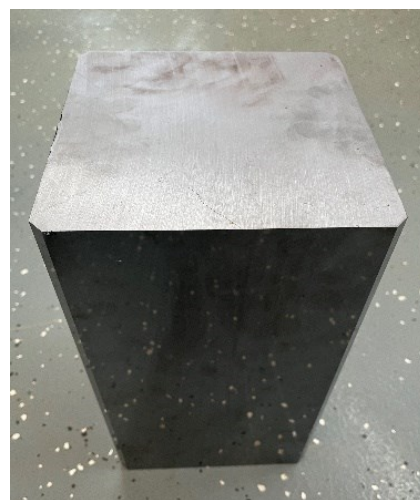
4. ábra Monokristályos szilícium seed és ingot (saját készítésű kép)

Attól függően, hogy milyen átmérőjű és milyen hosszúságú szilícium hengereket szeretnének létrehozni, függ a húzási és forgási sebességtől, valamint az olvasztótégely űrtartalmától. Általában az ilyen ingotok átmérője, amit a napelemiparban használnak az körülbelül 210-320mm és a hosszúsága akár 4-5 méteres is lehet. [13]

Ennél a gyártási folyamatnál fontos az elkészült termékek ellenőrzése. A szilícium ingotokat megvizsgálják, hogy keletkeztek-e hibák az előállítás során. Ilyen hibák lehetnek mikrorepedések vagy az öntvénybe kerülő nemkívánatos anyagok, amelyek befolyásolhatnák a további előállítási folyamatokat a gyártás és a minőség szempontjából. Ugyanis, ha az ilyen termékek feldolgozásra kerülnének, akkor később rossz minőségű cellák keletkeznének és a későbbiekben magas teljesítményvesztést is okozhatna a kész fotovoltaiikus cellákban. Végül az ingotokat megvizsgálják még a geometriai és egyéb tulajdonságai alapján.

### 4.3. Blokk létrehozása és vizsgálata

Ha az elkészült szilícium ingotok kerülnének felszeletelésre, akkor kör alakú szilícium lapokat kapnánk eredményül, azonban ezek a napelem panel összeszerelésénél nem lennének megfelelőek az illesztés szempontjából, ezért négyzet alakú tömbökké alakítják. Azonban, ha szabályos négyzet alakú blokkok kerülnének elkészítésre, akkor sok lenne az anyagpazarlás, ezért az ingot széléit levágják úgy, hogy egy lekerekített négyzet alakú blokkot (5. ábra) kapjanak eredményül. Ez anyagtakarékosság szempontjából is hasznosabb, ugyanakkor praktikusabb is lehet abból a szempontból, hogy így kisebb a valószínűsége annak, hogy a blokkból felszeletelt wafereknek letörik a sarka. [12] Manapság a levágott részek nem mennek kárba, helyette újra felhasználják a napelemek gyártásában.

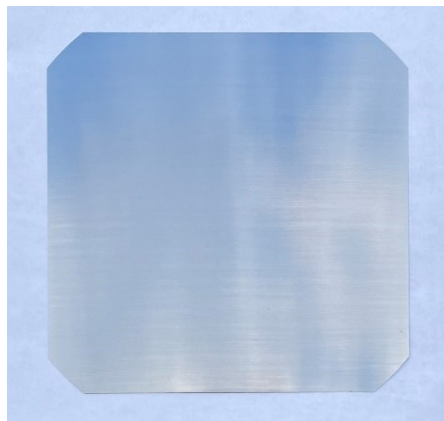


5. ábra Szilícium blokk  
(saját készítésű kép)

Az elkészült blokkok vizsgálatára itt is sor kerül, ugyanis a készítés során kialakulhattak különféle hibák. Például térfogati hibák, diszlokációk. Ebben a fázisban a tömbök vizsgálata mérvadó, hiszen, ha a tömb belsejének valamelyik részén kialakul egyfajta mikrorepedés vagy légbuborék, akkor a tömb a szeletelése közben nem lesz megfelelő ugyanis az így keletkezendő szeletek könnyebben eltöredeznek és később már nem lehet felhasználni. Tulajdonképpen fontos az ilyen hibák mielőbbi észrevétele, mert ezzel rengeteg időt és pénzt meg lehet takarítani.

#### 4.4. Szilícium wafer létrehozása és vizsgálata

A szilícium blokkok szeletelése, vágása során létrejön a szilícium wafer (6. ábra). Ezek történhetnek plazmavágás vagy lézervágás segítségével, de leginkább a mechanikai úton történő szeletelést szokták alkalmazni. Erre tipikusan két megoldás ismert. Az első, hogy egy többszálú gyémánttal bevont acélhuzal segítségével szeletelik fel vagy egy gyémánt pengével. Ezekkel egyenletes vastagságú szeleteket lehet előállítani. Az így elkészült waferek vastagsága körülbelül 150-180 $\mu\text{m}$ . [15]



6. ábra Monokristályos szilícium wafer  
(saját készítésű kép)

Mint ahogy a blokkok és ingotok esetén itt is szükség van az elkészült fázisban lévő termékek vizsgálata. Leginkább ennél a fázisnál lényeges, hiszen ténylegesen itt derül ki, hogy később a fotovoltaikus cella milyen teljesítményű és hatékonyságú lesz, ezért is fontos az esetleges hibák előzetes észrevétele, hogy a későbbiekben ne legyen meglepetés, ha esetleg nem működik megfelelően a már véglegesen elkészült cella. Illetve a selejtezésük is olcsóbb, mivel összetörhetőek és újraolvaszthatóak (nincs még rétegfelépítés vagy fémezés).

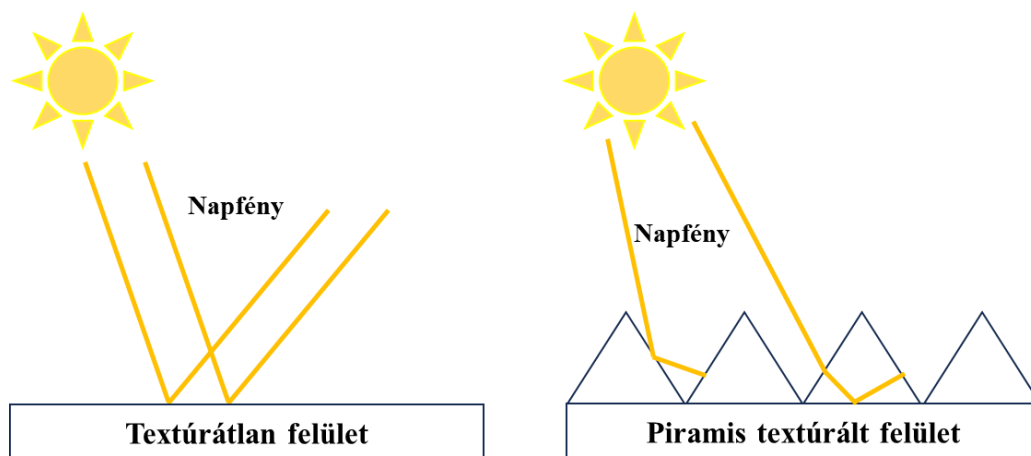
Ennél a fázisnál kiderül, hogy milyen a waferek geometriai formája, mekkora a vastagságuk, fajlagos ellenállásuk, hőmérsékletük, megvizsgálják a töltéshordozók élettartamát az adott wafernek, valamint a vezetőképesség szempontjából is megállapítják, hogy p-típusú vagy n-típusú a wafer. Ezekből mind következtetni lehet, hogy milyen minőségű és milyen hatékonyságú lesz a fotovoltaikus cella, mely később beépül a napelem panelba. Ugyanakkor vizsgálható a szeletelés során esetlegesen bekövetkezendő sérülések is. Ide sorolhatóak a felületi mikrokarcok, edge defect, ha a termék szélén letörés tapasztalható, amelyek általában pár mikron nagyságúak. De előfordulhat olyan is, hogy a wafer felületéből törik le egy kis darab az ilyen jelenséget chipping-nek nevezik. Ezek a defektek az emberi szem számára észrevehetetlen és ezek rendellenességek mind befolyásolhatják a napelem teljesítményét a későbbiekben. A waferek minőségi tulajdonságaira, valamint az esetleges hibák beazonosítására már teljesen automatizált szortírozó gépek állnak rendelkezésre. [12]

#### 4.5. Fotovoltaikus cella létrehozása és vizsgálata

Miután a minden lépés megtörtént, a vizsgálatokon átment waferek-ből elkezdődik a fotovoltaikus cella létrehozása, amely több folyamaton megy keresztül mielőtt kialakul a végleges termék, ezt szeretném röviden részletezni.

Először is a waferek felületét megtisztítják valamilyen lúgos vagy savas oldat, esetleg ipari szappan segítségével, hogy eltávolítsák a felesleges maradványokat, amelyek befolyásolnák a későbbi előállítási eljárást. [16]

Ha ez megtörtént, akkor a szilícium wafer felső felületén a textúrákat alakítják ki maratással, amely során a wafer felületén piramisszerű textúra alakul ki. Ennek a jelentősége, hogy csökkentsék beeső fény visszaverődési veszteségét. A 7. ábrán figyelhető meg hogyan viselkedik a napfény a textúrált, illetve a textúrátlan felülettel. [12]



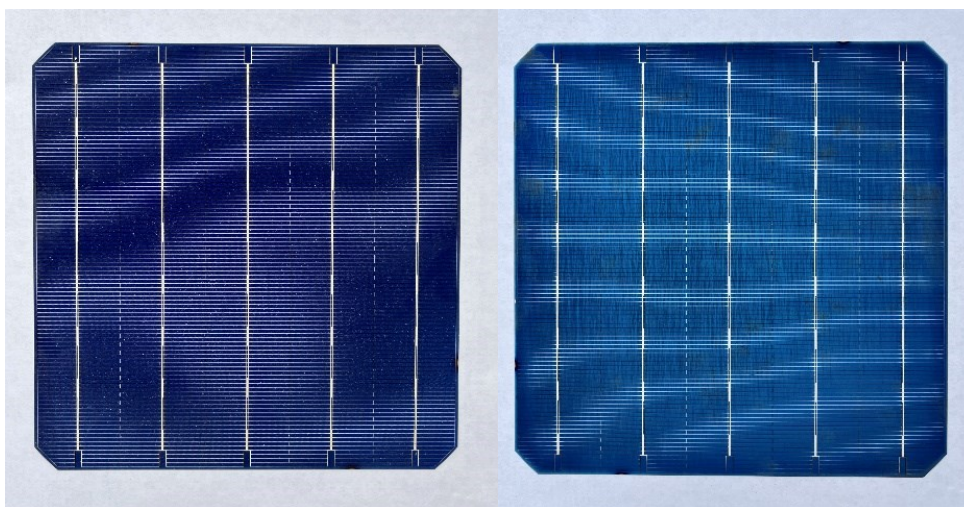
7. ábra Textúrált felületi különbségek (saját készítésű ábra)

Majd újabb savas tisztítás után a diffúzióra kerül a sor, amely során különféle adalékanyag juttatnak a szilícium waferhez, annak érdekében, hogy növeljék az elektromos vezetőképességét. Ha a wafer az előzetes egykristály növesztéses eljárás során p-típusú adalékanyaggal volt dópolva, mint például bórral, akkor az elkövetkezendő diffúziós eljárás során negatív (n-típusú) felületet kapnak magas hőmérsékleten történő foszfor diffundálással. Ezzel létrehozva a pozitív-negatív (p-n) átmenetet. [2] Az így létrejött átmenettel lehetővé válik, hogy az n-típusból az elektrontöbblet átjusson a p-típusba és ezzel elektron mezőt generáljon az átmenetben. [17], [12]

A diffúzió során a foszfor nem csak a wafer első oldalára, hanem a szélei körül és ugyanúgy a hátsó oldalára is bediffundál, ezzel létrehozva egy elektromos pályát az első és hátsó oldal között, így megakadályozva az elektromos szigetelést a két oldal között. Ezért a következő maratási módszer célja a wafer szélei körül az elektromos pálya eltávolítása. [12]

Azonban a textúrált felület még mindig nem elég, hogy a fényvisszaverődést csökkentsék és növeljék az elnyelt fény mennyiségét a cellákban, ezért AR bevonatot (antireflektív) állítanak elő a felületen. Ehhez a visszaverődésgátló bevonathoz általában titánum-dioxidot ( $\text{TiO}_2$ ) használnak. A fotovoltaikus cella színe ennek az antireflektív bevonat vastagságával variálható. [16]

Következő lépésben vezető réteget (kontaktusrács) nyomtatnak az első és hátsó oldalra, majd egy szinterező kemencében megszáritják, hogy a fémaszták a waferre szilárduljanak, ez általában ezüstből vagy alumíniumból készül. Ezzel létrejön a kész fotovoltaikus cella (8. ábra). [16]

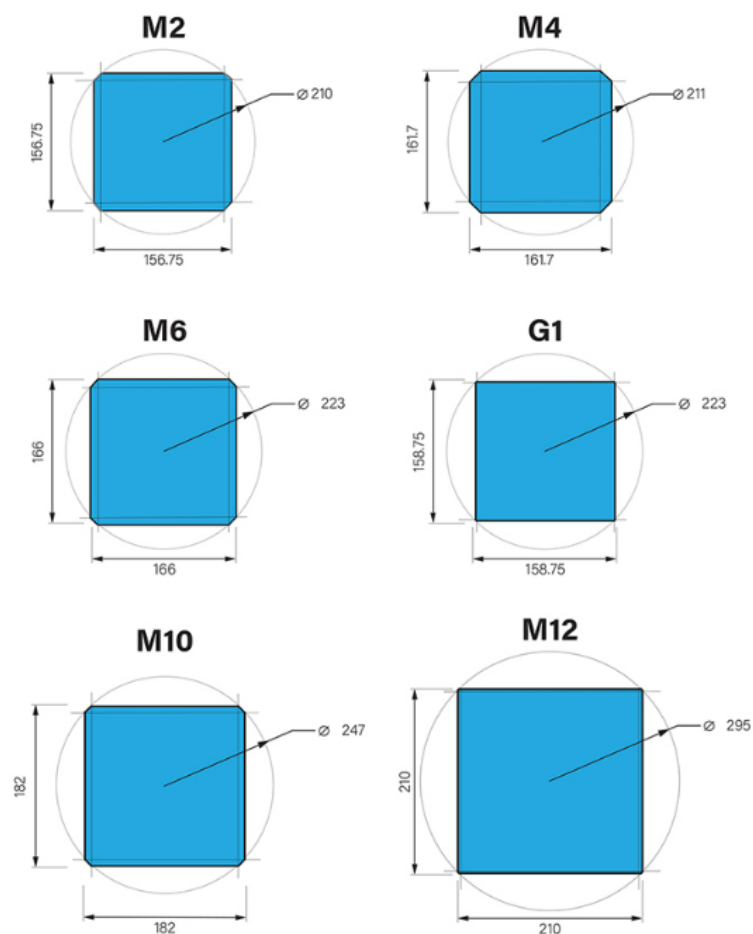


8. ábra Fotovoltaikus cella első és hátsó oldala (saját készítésű kép)

Végző lépésben az elkészült cellákat tesztelik. Elsősorban a feszültség-áramerősség görbét mérik meg szimulált napfény alatt. Itt leselejtezik azokat a cellákat, amelyek nem mennek át a teszten. Azokat, amelyek megfelelnek, különböző szintekbe rendszerezik, hogy a napelem rendszerbe az azonos teljesítményű és hatékonyságú fotovoltaikus cellák kerüljenek beépítésre, ezáltal precízebb és stabilabb működést fog eredményezni az elkészült rendszer. Az ilyen tesztelésre automata szortírozó berendezések állnak rendelkezésre, amelyek már teljesítmény szerint rendszerezik a termékeket. Majd különféle

minőségellenőrzésnek vetik alá, hogy az elkészült napelemek tökéletesen megfeleljenek a vevők számára. [12], [16]

A következő képen a fotovoltaiikus cella méretei látható. Ezek közül a legújabb méret az M12 ezeket ipari installációknál használják (ahol méret és súly nem probléma). Azonban ez fejlesztésekkel jár a gyártás és a tesztelés területén is, ezért gyakran használják még az M10, illetve M6 méreteket, főleg lakossági használatra (kisebb táblák kevésbé terhelik a födémeket és könnyebben installálhatóak).



9. ábra Fotovoltaiikus cella méretek [38]

## 5. Blokk tesztelő mérőberendezés

A Semilab által fejlesztett napelemipari blokk mérő termékek közül alapvetően két különböző mérőegységet lehet bemutatni, amely szilícium tömbök mérésére van specializálódva. Ezek közül az egyik géppel csak egyetlen lényeges vizsgálatot lehet végrehajtani, míg a másikkal már sokkal komplexebb méréseket és ezzel együtt lényegesebb eredményeket lehet felmutatni. Az utóbbit szeretném leginkább bemutatni. A gép korábban M10-es minták vizsgálatára volt alkalmas, azonban, hogy technológiával lépést tartunk szükség volt változtatásokra, hogy nagyobb M12-es minták mérése is lehetséges legyen.

### 5.1. Alapvető tulajdonságai

A következő gépnél (10. ábra) a minták betöltése főként manuálisan történik, ugyanakkor vevői igény esetén lehetőség van teljesen automata robot támogatásra is, amelynél a robot helyezi be és viszi el a blokkot a mintatartóból. A maximum mérhető minta nagysága a változtatásokkal már 210x210x500 mm, amely az M12-es méretnek felel meg. Azonban továbbra is lehet kisebb méretű minták mérése is abban az esetben, ha a magasságuk legalább 50 mm, ez általánosságban minden mintára vonatkozik. [19]



10. ábra Szilícium blokk tesztelő mérőgép [19]

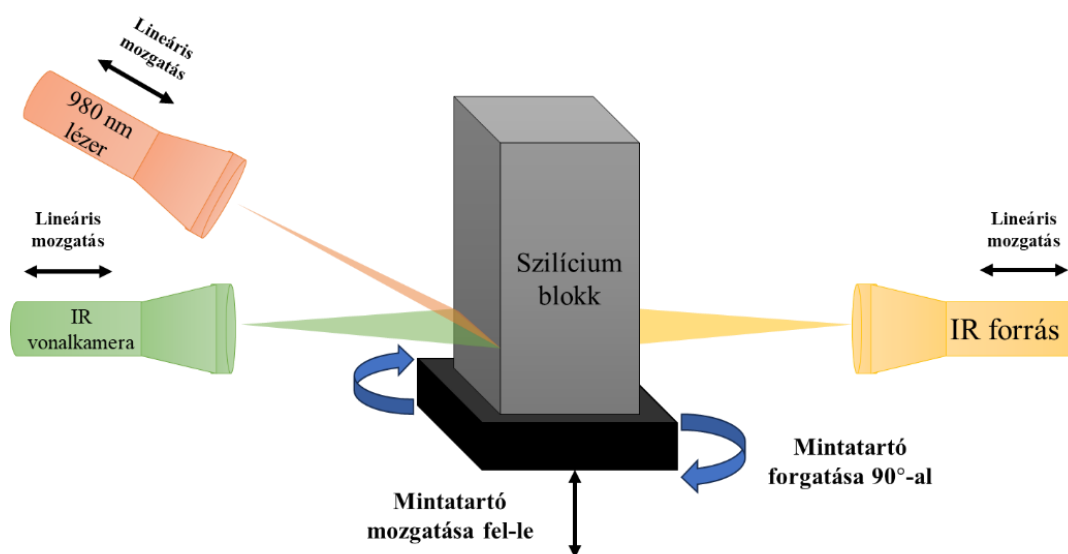
Mérések és vizsgálatok a géppel:

- Ellenállás mérés Eddy árammal (0,5-10  $\Omega\text{cm}$ );
- Élettartam mérés  $\mu\text{-pcd}$  segítségével;
- Pyro szenzorral történő hőmérsékletmérés;
- PN vezetőképesség típusú mérés;
- Fotolumineszcenciás (PL) képalkotás;
- Transzmissziós képalkotás;
- Súlymérés maximum 50 kilogrammig 20 gramm pontossággal;
- Minta sarok levágásának (chamfer) a szögmérése. [19]

Ugyanakkor képes a különböző hibák észlelésére is. Ilyen hibák a repedések, beleértve a belső feszültség által okozott mikrorepedéseket, mikroszemcséket, amelyek a termikus zavarás következtében jöttek létre. [18] Képes megállapítani, ha maradék oda nem illő anyag maradt a tömbben a gyártás során, ilyen például a szilícium-karbid ( $\text{SiC}$ ) vagy a szilícium-nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Ugyanakkor kialakulhat mikrokristályos szilícium is, amely az olvadt szilícium során következhet be, ez később gondot okozhat a fotovoltaiikus cellákban. [19]

## 5.2. Mérés ismertetése

Az alábbi ábra szemlélteti hogyan képzelhető el a mérés folyamata.



11. ábra Szilícium blokk komplex mérése (saját készítésű ábra)

A szilícium blokk vizsgálata során be lehet állítani a méréseknek a sorrendjét, mivel a lézeres mérés és az infravörös forrás segítségével történő mérés nem fut le párhuzamosan. Vannak azonban olyan mérések is, amelyek időben folyamatosan mérnek, ezek a mérések a PN vezetőképesség mérése, az ellenállás mérés, a hőmérséklet mérés és a súly-mérés.

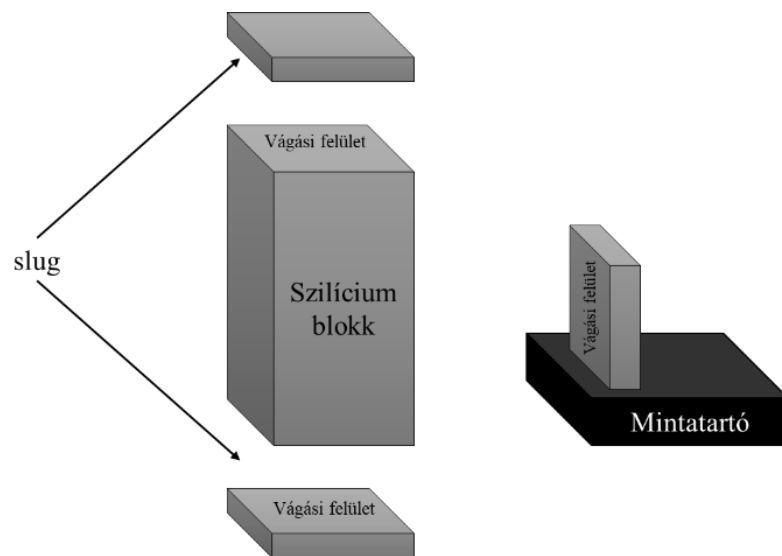
A mérés során minden ajtónak zárva kell lennie és minden előzetes biztonsági intézkedésnek eleget kell tenni a mérés kezdete előtt. Amint ez megtörtént a mérőegységen elhelyezett 2 távolságmérő szenzor segítségével fokozatosan közeledik a mintatartóhoz és megállapítja, hogy a mintatartó nincsen-e elfordulva (megengedhető maximum elfordulás a mérés során az  $\pm 1^\circ$ ), majd beállított távolsághoz viszonyítva közeledik a mintatartóhoz ez lesz a referenciapont. A következő lépésben a mintatartó ereszkedik amíg a szenzorok nem érzékelnek nagyobb távolságot, amely jelen esetben már a tömbhöz képest mért távolság lesz, majd 1 mm távolságra beállnak a tömbhöz képest, mivel csak adott távolságból lehet használni, a rendelkezésünkre álló eszközöket, ezért ezek a mérőegységek képesek a blokkhoz közeledni és távolodni. Mivel a minta az még mindig el lehet fordulva, ezért a két szenzor által mért távolság közül azt a távolságot fogja figyelembe venni amelyik közelebb van a tömbhöz képest és a továbbiakban ehhez fogja viszonyítani az 1 mm távolságot a mintától.

Ha megvan a megfelelő távolság, akkor a mérés a minta aljától kezdődik és a mintatartó folyamatosan ereszkedik lefelé, így a mérőeszközök képesek teljes egészében megmérni a tömböt. A mérésnek a magassága kétféleképpen történhet előre beállított értékkel, ahol megadhatjuk, hogy maximum mekkora magasságig vizsgáljuk a tömböt vagy automatikusan, ahol a minta súlyából a szoftver meghatározza a tömbnek a magasságát és ez alapján fogja mérni a szilícium blokkot a magasság szempontjából.

Amint ez megtörtént következő lépésben elfordul  $90^\circ$ -al, hogy mind a 4 oldalról készüljön eredmény és a mintatartó visszakérül az eredeti pozíciójába, hogy újra a minta aljától induljon a mérés, de előtte a mérőegységeknek el kell távolodniuk, hogy a forgatás során a tömb véletlenül se tegyen kárt a mérőeszközökben vagy a mintában. Végül az elejéről ugyanígy megy végbe a folyamat, amíg teljes egészében megméri a tömböt.

Általában az infravörös módszerrel történő átvilágítással szokták kezdeni a folyamatot, majd ezután következik a lézerrel történő fotolumineszcenciás képalkotás, mely során  $\mu$ -pcd segítségével megméri a töltéshordozók abszolút élettartamát egy vonalban.

A tömbök levágott részéinek (úgynevezett „slug”) frissen vágott felületét is meg lehet vizsgálni (12. ábra) tesztelés céljából, mégpedig lézerrel történő fotolumineszcenciás méréssel. Az ilyen levágott rész ugyanolyan minőségű, mint maga a szilícium blokk.



12. ábra Slug vizsgálata (saját készítésű ábra)

### 5.3. Vezérlőszoftver

A mérési eredmények feldolgozására, kiértékelésére, valamint a teljes mérés monitorozására egy beépített számítógép áll rendelkezésre, amely Etherneten keresztül kommunikál a mérésben részt vevő eszközökkel. A számítógépen lévő vezérlőszoftverrel lehetőség nyílik a teljes mérőgép kezelésére.

A vezérlőszoftver fontosabb tulajdonságai és feladatai:

- A felhasználó számára valós idejű monitorozást nyújt, így ezen keresztül figyelemmel lehet követni a vizsgálat folyamatát;
- Ezen keresztül lehet kiválasztani, illetve létrehozni a különböző recepteket, amelyek a fontosabb paramétereket tartalmazzák a vizsgálat szempontjából. Fontos, hogy különböző geometriai jellemzőkkel rendelkező blokkoknak különböző receptre lesz szükségük;

- Itt meg lehet adni a „Birck ID” -t, amely később a tömbnek a neve lesz és ezekhez fogja rendelni a későbbi mérési eredményeket, amely alapján lehet azonosítani a mintákat;
- A mérés szempontjából meg lehet adni a különböző méréshez szükséges paramétereket. Ez magába foglalja az inicializálást és a tesztelést is. Ki lehet választani milyen mérést hajtson végre, melyik oldalt szeretnénk vizsgálni a mintának;
- Be lehet állítani a mérések lépését és gyorsaságát;
- Rendszerezi és összegyűjti a mérési eredményeket és lehetővé teszi az elemzését táblázatok, képek segítségével. Valamint a vágásjelzőket is kalkulál az eredmények alapján, de ezek a felhasználó által változtathatóak;
- A gép összes fennálló hibáját érzékeli és ezeket kijelzi, ilyenkor a mérés nem indul el, amíg a hiba nem kerül megoldásra. Az ilyen hibák előfordulhatnak, ha az ajtó nincs bezárva vagy az eszközök között valamilyen kommunikációs hiba áll fent stb.;
- A szoftver jelszóval van védve a különböző szintű felhasználók számára, így csak az kezelheti a gépet, akinek megfelelő képzettsége és jogosultsága van hozzá.

#### 5.4. Biztonsági megoldások

A biztonsági intézkedések betartása mindig minden esetben az elsődleges, ugyanis ez az emberi élet védelmét szolgálja. Azért, hogy a mérés általában elinduljon teljesülnie kell minden biztonsági feltételnek. Ezeknek a feltételeknek a betartását egy safety PLC ellenőrzi, amely kizárólag arra van, hogy a biztonsági funkciókat képesek legyenek végrehajtani és betartani. A biztonsági előírások betartását több szenzor is szolgálja.

Minden kézzel nyitható ajtón mágneses biztonsági ajtókapcsolókkal van felszerelve. A fő ajtón van egy úgynevezett shutter-door, amely egy pneumatikusan működő ajtó ez a robot által történő betöltés esetén használatos. Ebben az esetben a pneumatikus munkahengeren elhelyezett 2 darab reed relé segítségével lehet érzékelni ajtó állapotát. A PLC ezeknek az állapotát (NC vagy NO) is figyeli mikor van ténylegesen bezárva az ajtó, ha a jelzett állapota a biztonsági szempontból nem megfelelő a mérés nem indul el, amíg

az nem teljesül. Továbbá egy kapacitív szenzor segítségével szolgál, amely érzékeli, hogy az ajtó megfelelően zárt állapotban legyen.

Két különböző vészfunkciót betöltő gombbal is rendelkezik a készülék, amely a mérőberendezés több pontján megtalálható, ugyanis vészhelyzet esetén szükséges a kézen fekvő gomb használata. Az első ilyen gomb az ESTOP (Emergency Stop), ha ezt benyomjuk akkor a gépen belül megáll minden mozgás és nem folytatódik tovább a mérés. A második az EMO (Emergency Off), amelynek a funkciója a teljes gép áramtalanítása és energiamentesítése, ha ez be van nyomva akkor megszűnik a tápellátás és kifújja a levegőt (energiamentes állapotba kerül).

A gépen belül található azonban egy Interlock-Override, amely kulccsal működtethető. Ezt kizárólag csak megfelelő jogosultsággal rendelkező felhasználó kezelheti ugyanis a betöltő funkciója felülírni az egyes biztonsági előírásokat. Ennek segítségével lehet beállítani, mozgatni az egyes mérőeszközöket, valamint a pneumatikusan működő ajtó nyomás beállítását ennek segítségével lehet elvégezni a készülék nyitott állapotában.

## 6. Blokk súlymérés, magasságmérés

A mintáknak a vizsgálata mindig a magasság meghatározásával kezdődik ugyanis ez egy meghatározó érték a vizsgálat további fázisaiban, ha ezt nem az általunk betáplált érték alapján szeretnénk meghatározni, akkor a magasságot a szoftver kiszámolja a blokk súlyából.

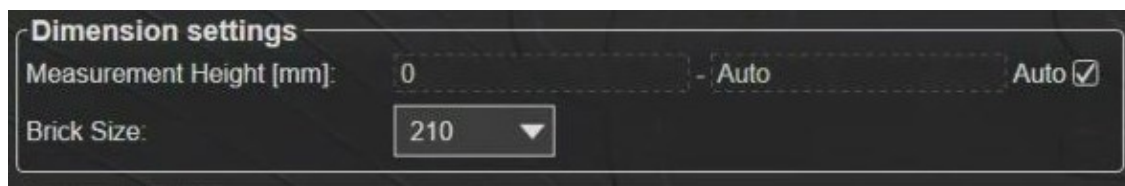
A szoftver a következő értékek alapján számolja ki a magasságot:

- $\rho$ : Szilícium tömb sűrűség, amely körülbelül  $2,33 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ;
- $V$ : Szilícium tömb térfogata;
- $A$ : Szilícium tömb alapterülete;
- $m$ : Szilícium tömb tömege.;
- $M$ : Szilícium tömb magassága.

Az alábbi adatok közül a sűrűség egyetlen, ami mindig adott. Hiába dópolt szilíciumról beszélünk a sűrűségét nem lehetne pontosan megállapítani és a dópolás során nem változik annyit, hogy lényegesen befolyásolni tudja mérést. A minta súlyát a mintatartóra helyezése során egyből megállapítja, ugyanis az egy mérlegként is szolgál, amely képes 50 kg-ig megmérni az adott mintát. Mivel már két paraméter is adott, ezért a következő összefüggésből  $m = \rho \times V$  megállapítható a tömb térfogata. Majd a következő egyenletből  $V = A \times M$  kiszámítható a tömb magassága. Itt csak egyetlen adatot kell megadni, ami a tömb alapterülete. Az alapterület a tömböknél M6 és M12 esetén nagyjából oldal x oldal szorzással számítható ki, azonban M10 nagyságú tömb esetében a chamfer már túl nagy és ott egy egyenlő szárú derékszögű háromszög területét le kell vonni a szorzatból.

Azonban az M6, M10, M12 szabványok szerint a gyártók többnyire ugyanolyan tömböket gyártanak, ahol a chamfer nagysága ugyanakkora az egyes típusoknál. Tehát a beállításoknál csak a tömb méretét kell kiválasztani és a szoftver kiszámolja az adott minta magasságát a betáplált paraméterek alapján. A minták mérése csak addig a pontig fog tartani a tömb vizsgálata, amit a szoftver előzetesen kiszámolt vagy amit az operátor meghatározott.

A következő képen a magasság meghatározásának a beállítása látható, meg lehet adni a magasságot, hogy meddig mérje és ki lehet választani az Auto módot. Jelen esetben egyszerűbbnek véltem minden minta mérése során az Auto mód használatát, mivel a tömb nagysága ismeretlen volt és nem szerettem volna, hogy a mérés túlságosan túlmenjen a tömbön vagy éppenséggel ne érje el a megfelelő magasságot. Így elegendő volt csupán a vizsgált tömb méretét meghatározni, ami a képen is látható, hogy egy M12-es tömb volt, vagyis az alapterülete 210x210 mm.



13. ábra Magasság beállítás (saját készítésű kép)

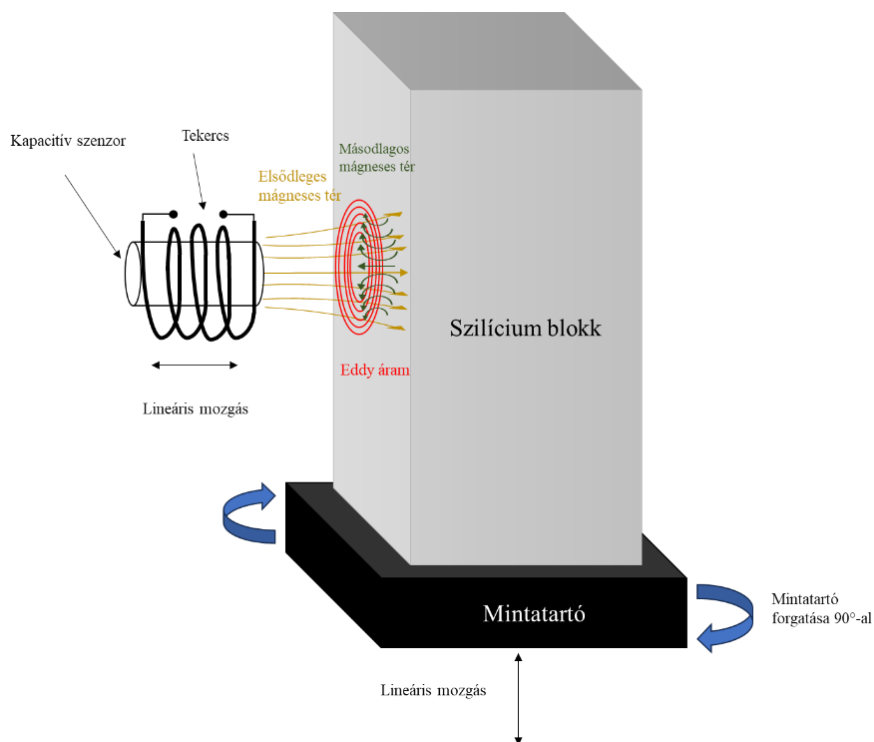
A fejlesztés szempontjából ennél a mérésnél csak egy új mintatartó cseréjére volt szükség, hogy a nagyobb tömböt is rá lehessen helyezni. De ehhez az egész állomást kifelé kellett mozgatni, ugyanis a forgatás során megakadt volna a gép falában. Továbbá az teljes mérleget szét kellett szedni, hogy az új tartó beépülésre kerüljön. Később az összeszerelés után egy ismert súlyú tömbbel megnéztem, hogy mindent sikerült-e megfelelően bekötni és visszailleszteni az eredeti állapotába.

## 7. Eddy árammal történő ellenállásmérés

Ahhoz, hogy ellenállást tudjunk mérni anélkül, hogy roncsolnánk a szilícium tömböt, akkor érintésmentes Eddy áram (örvényáram) technikával történő mérés alkalmazása a célszerű. A Semilab erre a célra kifejlesztett egy úgynevezett Eddy-Probe készüléket.

### 7.1. Működési elve

Váltakozó árammal (AC) gerjesztve a mérőfejben található tekercset, létrejön egy elsődleges mágneses tér. Amint a szenzor egy vezető anyag közelébe kerül ennek a következményére, egy másodlagos mágneses tér keletkezik, amely hatására (örvény) áramok indukálódnak a mintában. Az anyag vezetőképessége meghatározó tényező az örvényáramok erősségében. Minél magasabb az anyag vezetőképessége, annál erősebbek az örvényáramok a mintában. Az örvényáramok mérése valójában az anyag elektromos veszteségének mérését jelenti. [20] A mérésnek a műveletét a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra Ellenállás mérése Eddy árammal (saját készítésű ábra)

A szilícium blokk mérése során a mérőszensor állandó távolságban kell legyen a mintától anélkül, hogy hozzáérne és folyamatosan méri a tömböt, eközben a mintatartót mozgatjuk. Az 5.2. fejezetben leírtak alapján megméri a minta négy oldalát egy-egy

vonásban. Mivel a mért jel függ a minták ellenállásától, valamint a szilícium blokk és a mérőfej távolságától, ezért van egy beépített távolságmérő szenzor a készülékben, amely a kapacitív távolságmérés alapján működik és képes ugyanazon a helyen mérni, mint az Eddy-Probe. Az így alakuló távolságértékből és az örvényjelből valóságos ellenállás értékeket kaphatunk. Ahhoz, hogy az ellenállásmérés tökéletes legyen a mérőszondának legalább 15 mm-re kell elhelyezkednie a tömbtől. Az így lehetséges ellenállás érték mérési tartománya 0,5  $\Omega\text{cm}$  és 10  $\Omega\text{cm}$  közé esik.

## 7.2. Fontosabb befolyásoló tulajdonságok

Mivel az örvényáram választ nagymértékben befolyásolja a választott vizsgálati frekvencia, ezért nincs olyan mérőszonda, amely képes lenne minden ellenállás tartományban mérni. Jelenleg 4 különböző ellenállás tartományban képesek mérni a különféle mérőfejek:

- 0,001 - 0,1  $\Omega\text{cm}$ ;
- 0,01 - 0,5  $\Omega\text{cm}$ ;
- 0,5 - 10  $\Omega\text{cm}$ ;
- 10 - 20  $\Omega\text{cm}$ .

Ezek mind különböző frekvenciatartományban működnek, ezért nem lehet minden ellenállásértéket mérni egyetlen készülékkel. Jelen esetünkben az alapfrekvenciának körülbelül 120 - 130 MHz-nek szükséges lennie, hogy képesek legyünk mérni a 0,5  $\Omega\text{cm}$  és 10  $\Omega\text{cm}$  közötti ellenállás értékeket.

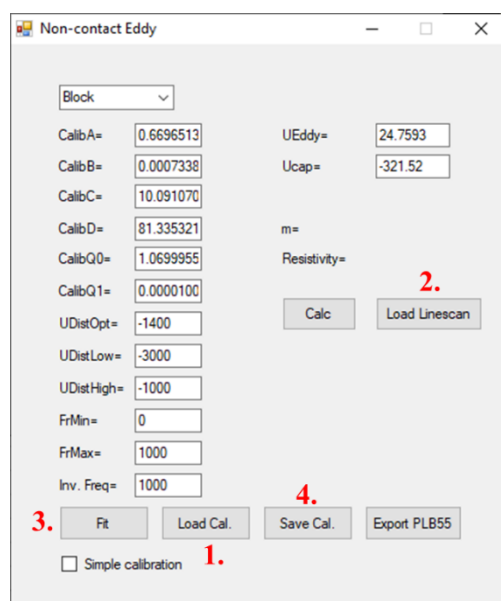
Fontos a szilícium tömb geometriai alakja is, ugyanis, ha a mintának nem lapos a felülete, akkor a különböző geometriai tényezők befolyásolják a kapott örvényáramú jelet és ezzel pontatlan mérési eredményeket produkálnak. Az ilyen geometria tényező lehet a minta felületének görbülete vagy esetleges barázdák.

Lehetséges befolyásoló tényező lehet a távolság is. Ha a mérőfej túl közel van a mintához, akkor túl nagy lesz a hatása a tekercsre és így nem tudunk pontos eredményeket kapni. Hibás eredményeket kaphatunk a mintától túlságosan távol elhelyezett mérőfej esetén is. Ezért fontos a megfelelő távolság megválasztása.

### 7.3. Eddy-Probe kalibrációja és a mérési eredmény kiértékelése

Az Eddy-Probe előzetes kalibrációt igényelt, ezt egy erre a célra kialakított kalibráló állomáson végeztem el. A bekötés után a szenzort hagyni kell, hogy a mérés előtt körülbelül 30-45 percig melegedjem, ha ez kimarad, akkor a mérés során a mért értékek szórása magas lesz és hibás eredményeket fogunk kapni. A kalibráció során 5 különböző ellenállással rendelkező mintát mértem meg 21 különböző távolságból, amelyet a kalibrációs állomáson könnyedén el lehetett végezni. Végül mérési eredményeket egy „txt” kiterjesztésű fájlba rendszereztem.

A mérés végeztével szükség volt a config fájl létrehozására, amit később mérőberendezés szoftverébe kell betáplálni. A fájl létrehozáshoz a Semilab kifejlesztett egy külön erre a célra használható programot (15. ábra). Ennek a programnak a használatát szeretném a következőkben bemutatni. Először a Load Cal. segítségével betöltöttem egy régebbi szenzor kalibrációs „cfg” kiterjesztésű fájlt, amelyet az új kalibrációs adatokkal fogok felülírni. Amint ez megtörtént a Load Linescan gombbal kiválasztottam az előző mérésnek az eredményeit, amely jelen esetben a létrehozott „txt” kiterjesztésű fájl, ezek alapján a program meghatározza a képen látható Calib értékeket. Végül Fit gombbal felülírtam a régi előzetesen betöltött fájlt és a Save Cal. gombbal elmentettem. Ezzel elkészült a szenzor config fájlja. Ennek a fájlnak az elérési útját kell majd megadni a szoftveren belül.



15. ábra Config fájl létrehozása (saját készítésű kép)

A config fájl elkészítése után a mérőszenzort bekötöttem a gépbe (egy 7 vezetékes szalagkábel jön ki a mérőfejből). A szalagkábel vezetékeit egy sorkapocsba kötöttem, amely egy D-SUB 17W2 MALE csatlakozóban végződtek. Ez a csatlakozó két trigger jelnek is átvezet, de ebből csak egy kerül felhasználásra az Eddy-Probe mérőfejünk számára. A csatlakozóra 3 fő kábel van felszerelve. Ebből az első egy D-SUB9 RS-232, amely a mérőfej kommunikációjára szolgál, ebből a szenzor 3 vezetékkel vesz igénybe az RX, TX és GND átvezetésére. Ez közvetlenül a számítógéphez csatlakozik soros porton. A második kábel a Trigger jelnek ad helyet, amely egy gyűjtőkábelen keresztül a számítógéphez csatlakoznak, ehhez további két vezeték csatlakozik a szenzorból. Végül az utolsó kábel szolgáltatja a 12 V tápfeszültséget a mérőfel számára és a további 5 V-ot a készülékbe épített PIC mikrovezérlő számára, erre a kábelre csatlakoznak továbbá a PN-Tester bemenetei is.

A bekötés után elindítottam egy mérést. Fontos, hogy ez a készülék nagyon érzékeny a távolságra, ezért a tömbtől körülbelül 1 mm-re kell elhelyezkednie a mintától, ugyanis ez az ideális távolság a vizsgálat szempontjából. Az előzetes követési beállítások alapján erre a távolságra automatikusan beáll. Majd a képen látható eredményeket kaptam.

| Sequence Number | Eddy Voltage | Frequency | Distance Voltage | Resistivity | Height (mm)  |
|-----------------|--------------|-----------|------------------|-------------|--------------|
| 0               | 0,998600464  | 120998400 | 5,461506042      | -1          | -19          |
| 1               | 1,128282166  | 121049600 | 5,345953674      | -1          | -11,51200008 |
| 2               | 1,218647461  | 121465600 | 5,108101501      | -1          | -4,024000168 |
| 3               | 2,339487305  | 121817600 | 4,603373108      | 1,055553317 | 3,463999987  |
| 4               | 2,312598267  | 121830400 | 4,607471924      | 1,095678449 | 10,95199966  |
| 5               | 2,321792908  | 121836800 | 4,598438416      | 1,094101071 | 18,44000053  |
| 6               | 2,319456482  | 121836800 | 4,607260437      | 1,084016442 | 25,9279995   |
| 7               | 2,328842468  | 121836800 | 4,592113953      | 1,091628075 | 33,41600037  |
| 8               | 2,331581726  | 121836800 | 4,597975159      | 1,077658057 | 40,90399933  |
| 9               | 2,332266541  | 121836800 | 4,593231812      | 1,084015012 | 48,39199829  |
| 10              | 2,345137024  | 121843200 | 4,585618286      | 1,073880911 | 55,88000107  |
| 11              | 2,362519226  | 121849600 | 4,561851196      | 1,081010461 | 63,36800003  |
| 12              | 2,330181885  | 121843200 | 4,596383972      | 1,082670331 | 70,85600281  |
| 13              | 2,337896118  | 121843200 | 4,592285156      | 1,075869918 | 78,34400177  |
| 14              | 2,347906494  | 121849600 | 4,581156921      | 1,076093554 | 85,83200073  |
| 15              | 2,348631592  | 121849600 | 4,581610107      | 1,074104309 | 93,31999969  |
| 16              | 2,351612549  | 121849600 | 4,576937256      | 1,076316833 | 100,8079987  |
| 17              | 2,378612366  | 121856000 | 4,553774414      | 1,066397905 | 108,2959976  |
| 18              | 2,358803101  | 121849600 | 4,570834351      | 1,073658943 | 115,7839966  |
| 19              | 2,365409546  | 121849600 | 4,56366394       | 1,073435426 | 123,2720032  |
| 20              | 2,362640076  | 121849600 | 4,562062683      | 1,080339432 | 130,7599945  |
| 21              | 2,367937317  | 121849600 | 4,558205566      | 1,077434301 | 138,2480011  |
| 22              | 2,364624023  | 121849600 | 4,560189514      | 1,079891205 | 145,7359924  |
| 23              | 2,358178711  | 121849600 | 4,564963074      | 1,0835675   | 153,223999   |
| 24              | 2,349658813  | 121836800 | 4,570854492      | 1,088951111 | 160,7120056  |
| 25              | 2,354482727  | 121836800 | 4,56441925       | 1,090503454 | 168,1999969  |
| 26              | 2,421725464  | 121843200 | 4,490227661      | 1,087826848 | 175,6880035  |
| 27              | 2,430386353  | 121721600 | 4,487347412      | 1,07810545  | 183,1759949  |
| 28              | 1,463287354  | 121190400 | 4,56605072       | 5,487393856 | 190,6640015  |
| 29              | 1,049367371  | 121036800 | 5,43732605       | -1          | 198,1519928  |
| 30              | 0,989546814  | 120992000 | 5,458414307      | -1          | 205,6399994  |

16. ábra Ellenállásmérés eredmények (saját készítésű kép)

A képen megfigyelhető, hogy a szoftver a miképpen rendszerezi a méréseket, ez név szerint Eddy feszültség, frekvencia, távolsági feszültség, ellenállás és a tömb adott magassága. Az eredményeken látszik, hogy a szenzor már akkor elkezdett mérni amikor még nem volt a tömb kezdeténél, ez észrevehető a magasságértéknél, ugyanis itt az első három érték még negatívan van feltüntetve és pozitív értékétől kell figyelembe venni az eredményeket. Valamint a szenzor úgy lett beállítva, hogy a mérés során távolsági feszültsége körülbelül 4,5 körül érték legyen. Ezért ahol már nagyobb az eltérés ott még nincs vagy már nincs a minta a szenzor közelében. Azonban erre az ellenállás értékekből is rá lehet jönni, ugyanis ezeknél az értékeknél az ellenállásnál -1 értéket vesz fel, ami a jelen esetben azt jelenti, hogy a szenzor nem mért az adott pontban. Valamint észre lehet venni, hogy az utolsó mért értéknél az ellenállás nagyon kiugró. A készülék vásárlója beállíthat a mérőszoftverben kritériumokat az elfogadott ellenállás értékekre. Amennyiben ez a kiugró ellenállás érték kívül esik a beállított tartományon, a vágási magasságot módosíthatja a szoftver. Ezután valószínűleg ezt a részt levágják és ez nem kerül később feldolgozásra.

## 8. PN vezetőképesség vizsgálata

A pozitív-negatív vezetőképesség megállapítása fontos a későbbi cellák gyártása során. Erre a mérésre egy úgynevezett PN-Tester áll rendelkezésre, amely szintén a Semilab által fejlesztett termék. A működése az SPV (Surface Photovoltage) technikán alapszik, amely teljesen érintésmentesen működik, tehát nem szükséges az eszközt a mintához érinteni, hogy mérni lehessen, ezáltal roncsolásmentesen szabadon lehet vizsgálni a szilícium mintát. [21]

A vizsgálandó mintát egy pulzáló fény segítségével gerjesztjük, időnként létrehozva nagy koncentrációban szabad hordozókat (elektron-lyuk párokat). Egy magas érzékenységű érzékelő kapacitív módon kapcsolódik a szilícium blokk felületéhez közel. A minta felületi potenciálját a szaggatott fény hatására folyamatosan változik és ezt a mérőszondával lehet mérni. Amikor a fény be van kapcsolva akkor a minta közel van a flat-band állapothoz. Amikor ki van kapcsolva, akkor a mintának nagyobb a felületi potenciáljátja. Az így mért jel a világos és sötét periódusban mért potenciálkülönbségeket adja meg. Mivel a jel előjele függ a minta vezetési típusától, így használható a vezetési típus meghatározására. [21]

Vannak azonban különféle korlátai:

- A felületen lévő oxidréteg befolyásolhatja a mérés folyamatát;
- Savak, illetve más vegyszerek maradványai negatív hatással lehetnek a mérésre;
- A PN-Tester vagy a hordozót, vagy a réteget méri ez függ a rétegvastagságtól;
- Van olyan eset, amikor a sérült réteg vastagsága meghaladja a PN-Tester által használt fény behatolási mélységét, ami megnehezíti a minták mérését. [21]

A mérési folyamatát tekintve a szilícium blokk vizsgálata esetén hasonló távolságba helyezkednek, mint az ellenállás mérése során, ugyanis a két mérőeszköz egymás mellé vannak felszerelve ugyanarra a tartóra. Különbség a két mérőfej között, hogy ez nem igényel előzetes kalibrációt a vizsgálat előtt. Azonban ennél is hasonlóan, mint az Eddy-Probe esetében egy szalagkábel van bekötve a PN-Testerbe. A jelen esetben ez egy

5 vezetékes szalagkábel, amelynél a másik végén lévő vezetékeket egy sorkapocsba kötöttem be, ez az előző fejezetben leírtak alapján a D-SUB 17W2 MALE csatlakozó meghatározott bemenetéhez csatlakoznak. Ezeket a vezetékek egyetlen kábelben keresztül közvetlenül a vezérlő PLC-hez csatlakoztattam, ahonnan a készülék megkapja a kommunikációhoz szükséges jeleket, valamint a PIC vezérlő számára a további 5 V-ot és a GND-t is biztosítja. A számítógép a PLC-vel Etherneten kommunikálnak. Ebben az esetben nincs szükség trigger jelre, ugyanis ez a készülék egyből működésbe lép, ha a szilícium blokk elég közel kerül hozzá.

A mérés során a készülék körülbelül 1 mm-re helyezkedett el a tömbtől. Az alábbi ábrán a kapott eredményekből csak egy kis részlet figyelhető meg, mivel a PN-Tester folyamatosan mért, ezáltal a táblázat a vizsgált tömb esetén több, mint 1000 soros lett. Az eredményeket a tömb adott magassága és az adott pozícióban lévő PN vezetőképessége alapján rendszerezi.

A mérési eredményből észrevehető, hogy a tömb alsó részénél nem tudta meg felismerni a készülék a vezetőképesség típusát a mintán, ez okozhatja a dőpolás is, hogy nem megfelelően volt szennyezve a minta. A középső táblázatban a kezdeti érték az a magasság, ahol már a készülék képes volt hiteles eredményeket felmutatni és kiderült, hogy a mért tömb az P-típusú. Végül a harmadik képen látható eredmények utolsó soraiiban 1-2 milliméteren ugyanaz vehető észre, mint az első részben, hogy nem mutat eredményt. Azonban ez csak, azért van mert a mérés során a tömb legfelső részétől még pár milliméterrel túlmént, hogy teljes tömb biztosan végig legyen mérve és ne legyen kimaradt adat a mérés során és itt már nincs jelen szilícium minta a készülék előtt.

| Position (mm) | PN type | Position (mm) | PN type | Position (mm) | PN type |
|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| 0.00          | Undef   | 37.21         | PType   | 242.66        | PType   |
| 0.23          | Undef   | 37.44         | PType   | 242.89        | PType   |
| 0.47          | Undef   | 37.67         | PType   | 243.13        | PType   |
| 0.70          | Undef   | 37.91         | PType   | 243.36        | PType   |
| 0.94          | Undef   | 38.14         | PType   | 243.59        | PType   |
| 1.17          | Undef   | 38.38         | PType   | 243.83        | PType   |
| 1.40          | Undef   | 38.61         | PType   | 244.06        | Undef   |
| 1.64          | Undef   | 38.84         | PType   | 244.30        | Undef   |
| 1.87          | Undef   | 39.08         | PType   | 244.53        | Undef   |
| 2.11          | Undef   | 39.31         | PType   | 244.76        | Undef   |

17. ábra Részlet a PN mérés eredményeiből (saját készítésű kép)

## 9. Transzmissziós képalkotás

Amikor a beeső fény elér egy felületet három dolog történhet: elnyelődik (abszorpció), visszaverődik (reflexió) vagy áthalad (transzmisszió). Az abszorpció azt az energiamennyiséget jelenti, amelyet a mintaanyagban lévő elektronok veszítenek el, amikor a fényhullám egy közegen keresztül terjed. Reflexió esetén a felületről visszaverődik a fény abba a közegbe, amelyen keresztül érkezett. Eközben a transzmisszió egy átlátszó vagy áttetsző anyagon keresztül áthaladó fény mennyiségének mértéke. [22]

A transzmissziós vizsgálat egy anyag egy vagy több fajta fényre való áteresztőképességek kimutatására használható. A leggyakrabban használt hullámhosszok ezekhez a vizsgálatokhoz a 850 nm és 950 nm infravörös fény, 550 nm látható fény, 380-760 nm látható fehér fény, 365 nm ultraibolya fény. [23]

### 9.1. Mérés ismertetése

Az infravörös képalkotó technológia a szilícium blokkok és ingotok ellenőrzésére alkalmazott hatékony módszer a napelemgyártás folyamata során. Ennek segítségével lehetővé válik a kritikus hibák és problémák felismerése, amelyek negatívan befolyásolhatják a napelemek későbbi minőségét. Ez a technológia lehetővé teszi a csúszásvonalak, a zárványok, a mikrorepedések, a termikusan indukált belső feszültség és egyéb hibák előzetes azonosítását a tömbökben és a szeletekben is, jóval a cellák elkészítése előtt.

A zárványok lehetnek karbid és nitrid típusúak. A zárványok azonosítása különösen fontos, mivel ezek elég kemények ahhoz, hogy később a szeletelésnél eltörjék vagy károsítsák a fűrész, ezáltal ezek a hibák hosszabb időre is megakaszthatják a gyártást. Tehát az infravörös képalkotás segítségével azonosíthatóak a különféle hibák és ezek alapján finomhangolható a gyártási technológia, ezzel csökkentve a felesleges anyagvesztéseket. Ennek eredményeként javítják a gyártási folyamat hatékonyságát, javítják a termékek minőségét és hatékonyságát és csökkentik a napelemgyártóknak a karbantartási igényeket, így ez a technológia a napelemipar fejlődésében kulcsfontosságú szerepet tölt be. [24]

A nagy intenzitású infravörös forrás a szilícium sávszélességénél alacsonyabb fotonenergiával világítja meg a blokkot. A transzmisszió hatására a hibák szétszóródása

különbözik a tiszta, hibamentes területtől, amely könnyen azonosítható a kapott kép kiértékelésével. A fénynek a képét, amely átmegy a mintán egy rövid hullámhosszú infravörös vonalkamera rögzíti (18. ábra).



18. ábra Transzmissziós képalkotás (saját készítésű ábra)

A vonalkamera és az infravörös forrás ugyanazon a tengely mentén fekszik, ez a kialakítás egy vízszintes vonal képét rögzíti.

Ahogy a blokkot függőlegesen mozgatják ezek a beolvasott vonalak egy kétdimenziós képet alkotnak a blokkon keresztül. A forrás egy 1300 W-os halogén izzó. A forrás előtt lévő infravörös szűrő nem engedi a látható sugárzást, hogy áthaladjon csak az infravörös lámpa világítja meg a blokkot. Majd a minta képét egy IR kamera segítségével rögzítésre kerül.

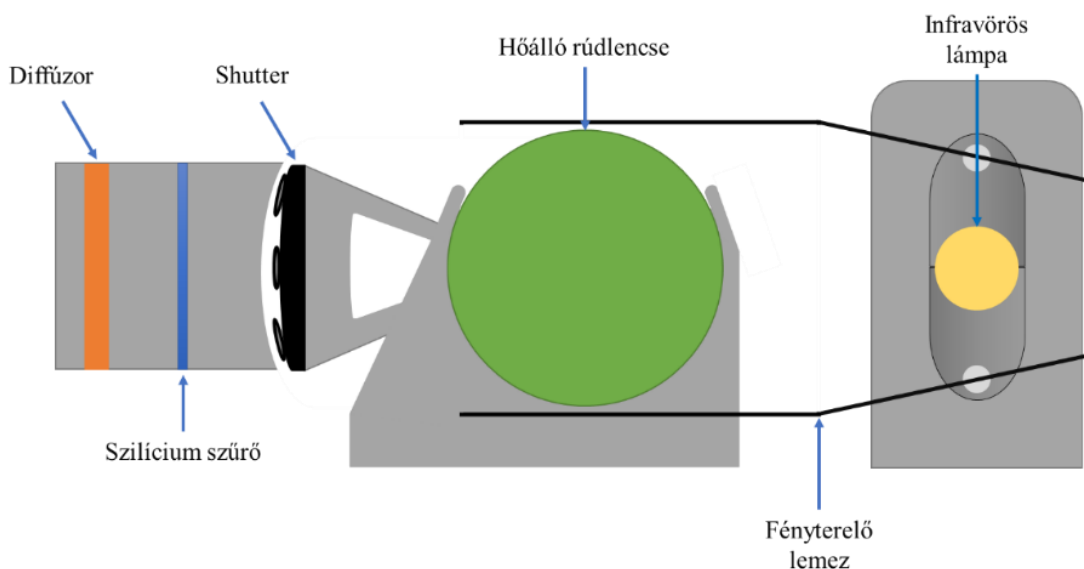
## 9.2. Infravörös fényforrás felépítése

- 1. Infravörös lámpa:** Az infravörös lámpa a jelen esetben már egy 1300W-os izzószál aranyozott fényterelővel irányítva.
- 2. Hőálló rúdlencse:** A hőálló rúdlencsének a fókuszálásban van leginkább a szerepe. A hőállóságra azért van szükség, mivel rosszul ereszti át az infravörös fényt és amit nem képes áteresztetni az elnyelődik és ez melegíti a lencsét. A melegítés hatására deformálódhatna és elveszíthetné a jelentőségét, ezért lényeges a hőállóság szempontjából.
- 3. Fényterelő lemez:** Az aranyozott fényterelő lemez a lencse és az infravörös lámpa körül helyezkedik el, azért, hogy csak a mintára összpontosuljon a fény és ne sugározzon a mérőgépen belül máshová. Az aranybevonatos fényterelő lemez növeli az infravörös lámpák hatékonyságát, ugyanis magas hőmérsékleten is stabil marad és minimalizálja a hővesztést, valamint az

arany hatékonyan tükrözi az infravörös fényt anélkül, hogy jelentős mennyiségű látható fényt sugározná ki. [25]

4. **Shutter:** A shutter egy pneumatikusan működő zárólemez, amely az infravörös fény útját tudja elzárni a mérés során. Mivel korábban már szó esett arról, hogy a lézeres és infravörös módszerrel történő mérés nem tud lefutni egyazon időben és egymás után kell újramérni az egész mintát, ha mind a két mérést alkalmazni szeretnénk, erre az esetre szolgál ez a fényzáró lemez. Ennek segítségével gyorsan lehet váltani a két mérés között.
5. **Szilícium szűrő:** A szilícium szűrők hasznosak az infravörös tartományban kívánt hullámhosszúságú sugárzás szűrésére, valamint jó fényáteresztéssel rendelkezik a távoli infra sávban is. Képes a háttérzaj kiszűrésére és lehetővé teszi az infravörös sávok mérését. [26]
6. **Diffúzor:** A diffúzor hatására a fényforrásban lévő fotonok izotróp szórást szenvednek. Ennek köszönhetően az optikai diffúzorokat különféle alkalmazásokhoz lehet felhasználni. Például a fény egyenletes elosztására, az átvitt jel érzékelhető szögtartományának kiszélesítésére, a képernyő megjelenésének egységesebbé tételére és a fény szétterítésére egy meghatározott szögbe. [27]

Az összeállítás a 19. ábrán látható.



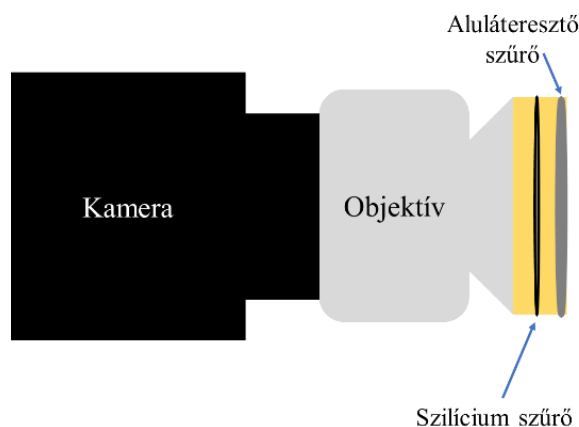
19. ábra Infravörös fényforrás felépítése (saját készítésű ábra)

### 9.3. Kamera felépítése és fontosabb tulajdonságai

A jelen esetben a kamera egy 1024 pixel széles InGaAs (indium-gallium-arzenid) vonalkamera. Az InGaAs szenzorú kamerákat olyan alkalmazásokban használják, ahol nagy érzékenységet igényelnek az infravörös hullámhossztartományban. Vannak olyan érzékelők, amelyek az anyagösszetétel miatt képesek akár 2500 nm-ig is mérni. Az InGaAs kamerák alacsony sáv szélességgel rendelkeznek, ezért érzékenyebbek a sötét zajokra, ezt azonban hűtéssel lehet csökkenteni. [28]

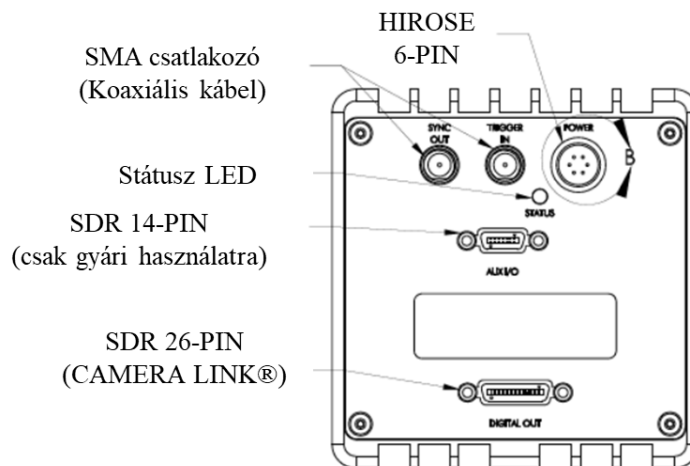
Képes pillanatfelvétel készítésre szkennelés közben. A kamera által kínált olvasási sebessége 80-45.956 vonal/másodperc, amely felhasználó által programozható. A kamera optikai érzékenysége lefedi a 800-1700 nm-es hullámhossztartományt, amelyet rövidhullámú infravörös (SWIR) régióknak neveznek. 1024x25  $\mu\text{m}$  pixelosztással és 25 vagy 500  $\mu\text{m}$ -es apertúra nyílással rendelkezik. A hűtés egy egyfokozatú termoelektromos hűtő és egy hőmérséklet érzékelésre beépített termisztor segítségével valósul meg. [29]

A teljes kameraegység felépítése a 20. ábrán látható. Alapvetően három részre lehetne bontani. Először is egy nagy felbontású kamerából áll ugyanis nagyon kicsi hibákat is észre kell venni a mérés során. A második az objektív, amely többek között segítségül szolgál a fókuszálásban, a fényáteresztés szabályozásában, valamint közvetlen hatással van a képminőségre is. Végül vannak a különféle szűrők a szilícium szűrő, amely hasonló funkciót tölt be, mint a lámpa felépítésénél és van az aluláteresztő szűrő, amely az 1100 nanométer alatti hullámhosszúságú fényeket átengedi, meg az ennél nagyobbakat blokkolja vagy elnyeli. Ez hatékonyan kiszűri az infravörös tartományba tartozó fényeket, így csak a látható fényeket engedi át



20. ábra Kamera felépítése (saját készítésű ábra)

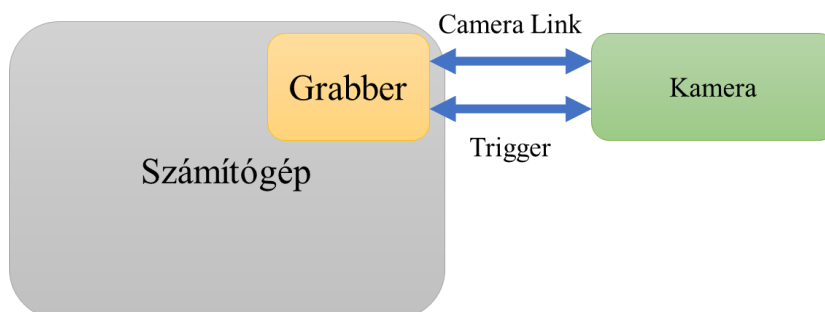
Az összes elektromos interfész a kamera hátlapján található, ezek csatlakozásait a 21. ábra mutatja.



21. ábra Kamera csatlakozói [30]

- **POWER:** A tápellátása mint a legtöbb ilyen kamerának HIROSE (6-PIN) csatlakozón keresztül történik és 12V-os tápfeszültség szükséges a működéséhez. A maximum áramfelvétele 1,5 A. [30]
- **SYNC OUT:** Ez a kimeneti időzítési jel a kamera integrációs idejét követi és magasra áll be, amikor a kamera integrál. A SYNC OUT jel periódusa a fókuszsík sorolvasásának vonalrátáját jelzi. Ezt a kimeneti jelet egy digitális vonalvezérlő hajtja meg. A csatlakozója SMA egy koaxiális csatlakozó típus. [30]
- **TRIGGER IN:** Az indító jelet vezérlő csatlakozó. Ezt a bemenetet a vonalráta és az expozíciós idő szabályozására lehet használni. A trigger bemenet fogadja jeleket 0 V-tól 5 V-ig maximum. A csatlakozója szintén SMA. [30]
- **STATUS:** A státusz LED jelzi, ha a kamera táp alatt van, ilyenkor zölden világít vagy valamilyen hiba esetén piros és zöld között váltakozik egyenletes 1 HZ-es arányban. [30]
- **DIGITAL OUT:** Ezen keresztül történik az adatátvitel és a kommunikáció. A kamera digitális adatkapcsolata egy alapvető Camera Link kompatibilis interfészen keresztül történik, alacsony feszültségű differenciális jellel (LVDS) használva, egy SDR-26-os csatlakozón keresztül. [30]

A következő kép a kamera kommunikációjának és irányításának blokkvázlata látható.



22. ábra Kamera kommunikációjának blokkvázlata (saját készítésű ábra)

A kamerát alapvetően a számítógéppel lehet konfigurálni és irányítani, hogy ez meg tudjon valósulni, szükség lesz egy frame grabber kártyára, amely közvetlenül a mérőszámítógépbe van építve és ez lehetővé teszi a kamera által felvett képek továbbítását, fogadását, feldolgozását és digitalizálását a számítógép számára. Ez Camera Link interfészen keresztül történik, amely magában foglalja az adatok átvitelét, kamerák időzítését, kommunikációt és valós idejű jelzéseket a kamerák felé. Ez egy erős kommunikációs kapcsolat, amely egy dedikált kábelkapcsolatot és egy szabványosított kommunikációs protokollt használ. Párhuzamos kommunikációhoz készült és több termékkel is kompatibilis. A nagy sávszélesség gyors átvitelt (850 MB/s) biztosít a nagy fájlok számára kelleltetési problémák nélkül, amely a jelen esetünkben a mérvadó. [31] Továbbá a kamera triggerelése is a számítógépen a grabber kártyán keresztül történik.

#### 9.4. Fontosabb beállítások és a mérési eredmények kiértékelése

A fejlesztés szempontjából ebben az esetben az infravörös fényforrást létrehozó egység nagyobbítására volt szükség. Itt a teljes megvilágító egység kiszélesítése történt, hogy a nagyobb mintát teljes szélességben átvilágítsa és ezzel együtt belekerült egy nagyobb 1300 W-os halogén izzólámpa.

##### Motorok

A motorok megfelelő beállítása nagyon fontos a biztonság és a mérés pontosságának szempontjából is. Minden motorhoz tartozik egy motorvezérlő, a jelen esetben 4 motorvezérlőre van szükség, mivel egy motor felel a tömb fel-le mozgásáért, egy a tömb forgatásáért, egy motorvezérlő a lámpa mozgásáért, illetve az utolsó annak az egységnek

a motorját vezérli, amely a szinte az összes mérőeszközt tartalmazza, ilyen az Eddy-Probe, PN-Tester, kamera,  $\mu$ -PCD és a lézeroptikai rendszer.

Elsősorban be kell állítani az egyes motoroknak a megfelelő IP-címét és a digitális bemenetek és kimenetek által végrehajtott funkciókat.

A beállítások során meg kell határozni az egyes motoroknak a különféle határait és korlátait is. Az áramhatárok esetén a pozitív és negatív csúcsáramokat, valamint a dinamikus fékezés csúcsáramát. A sebességhatároknál meg kell adni a pozitív és negatív sebességkorlátokat és a túlsebesség korlátot. Be kell állítani a maximális pozícióhibát, amely megadja, hogy mekkora maximális eltérést tolerál az elvárt pozícióhoz képest a rendszer. Továbbá a gyorsulás és a lassulás limiteket is.

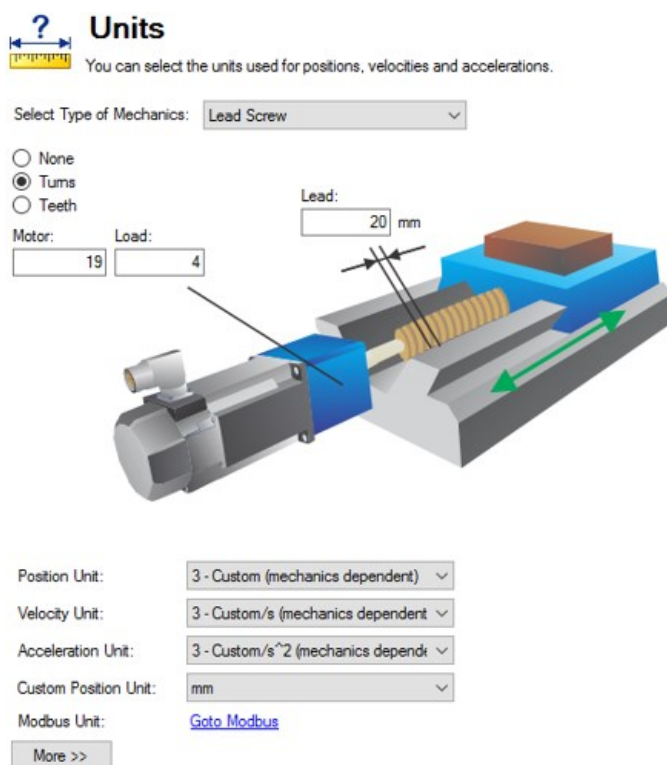
Majd a minden motoroknak a saját HOME pozícióját is meg kell határozni, amely a kiindulási pontként szolgál és ugyanide tér vissza a mérés végeztével. Minden motor esetében a beállítások elvégzésére többnyire adatlapok és leírások álltak rendelkezésre, de egyes esetekben tesztelést igényelt megfelelő értékek meghatározása érdekében.

### **Kamera trigger beállítások**

Ha a motorbeállítások megtörténtek be kell állítani, hogy a kamera megfelelő fókuszban legyen a tömbhöz képest.

A vonalkamera beállítása nagyon fontos a mérés szempontjából, mivel a mérés során a mintatartó, amelyen a szilícium tömb is elhelyezkedik folyamatos mozgásban van (5.2. fejezetben leírtak alapján), ezért fontos a megfelelő trigger jel megállapítása, amely meghatározza, hogy a kamera milyen időközönként rögzítsen képet. Ennek a beállítása függ a mintatartó lineáris mozgásáért felelős egységet alkotó alkatrészek paramétereitől, ilyen alkatrészek például a lineáris egység (amelyen a mintatartó helyezkedik el), ennek a motorja és hajtóműve, valamint az itt használt enkóder (amely ezért van, hogy pontosan meg tudjuk határozni a lineáris egység aktuális pozícióját). Az enkóder a motor fordulásokor impulzusokat küld, melynek száma megfelel a szögelfordulás mennyiségével. [40] A jelen esetben az enkóder 4096 impulzus számú, tehát fordulatonként 4096 jelet generál a kimeneten.

A hajtómű és motor adatlapját, illetve a lineáris egység menetemelkedését figyelembevéve elvégezhetjük motorvezérlő beállítását. A szoftver kiszámítja, hogy mennyit emelkedne a mintatartó a motor bizonyos körbefordulása esetén. Ezt a következő képen lehet megfigyelni.

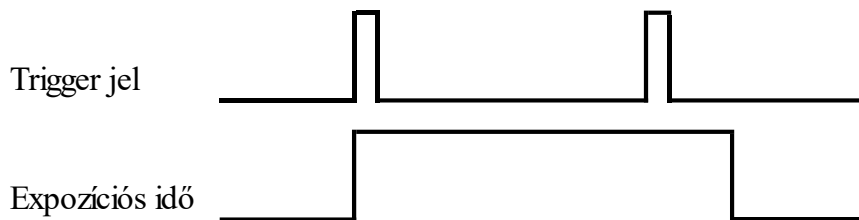


23. ábra Mintatartó mozgatásáért felelős egység paraméterei (saját készítésű kép)

Láthatjuk, hogy a hajtómű 1 teljes fordulása esetén 20 mm-t emelkedik vagy ereszkedik a mintatartó és összesen a motornak 19-et kell körbefordulni, hogy a hajtómű 4-szer forduljon meg. Tehát egy fordulat 4096 enkóder jelnek felel meg, ezért a 19 fordulat esetén  $19 \times 4096 = 77824$  jelet küld az enkóder, amely során a tömb 80 mm-t fog elmozdulni. Mivel a vizsgálat során 210 mm-es tömböket szeretnénk vizsgálni ezért a kamerának a látómezőjét (FOV) 230 mm-re határoztuk meg. Amelyet elosztva a pixelek számával meghatározható, hogy mennyi lesz egy pixel nagysága, amely a következőképpen fog alakulni  $230 \text{ mm} \div 1024 = 224,609375 \text{ } \mu\text{m}$  lesz egy pixel magassága és szélessége. Végül a következő összefüggéssel kiszámítható mennyi jelenként kell triggerelni a kamerát a megfelelő képfelvételekhez  $77824 \text{ jel} \div \left( \frac{80 \text{ mm}}{0,224609375 \text{ mm}} \right) \approx 218,5 \text{ jel}$ , tehát 219 jelenként kell triggeret adni a kamerának, ugyanis fél jeleket nem tudunk adni.

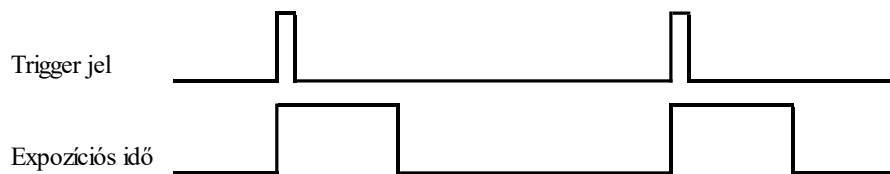
### Mi történne a hibás triggerelés esetén?

Az egyik tipikus kamera triggerelési hiba az over-triggering, amikor a jel úgy kerül beállításra, hogy a képek mintavételezése túl gyakran történik meg a kelleténél, ilyenkor az expozíciós idő túlmegy a következő trigger időn is, ez megnöveli az adatmennyiséget és a feldolgozási időt. Tehát a valóságban a szilícium tömbről készült képek összefolynak és értelmezhetetlen lesz a mérés.



24. ábra Kamera over-triggering (saját készítésű ábra)

A másik tipikus hiba az under-triggering, amikor a mintavételezés során a vonalkamera nem triggerel elég gyakran, ilyenkor az expozíciós idő már nem megy túl a következő trigger kezdetén, azonban a tömb folyamatos mozgásban van és nincs annyi trigger, ezért nem készül annyi kép amennyire szükség van. Ebben az esetben lényeges mérési eredmények tűnhetnek el, kimaradnak sorok a képből. Tehát meglehet, hogy a mérés kezdetén a tömb aljáról még készült kép, de a következő kép már lehet csak a tömb közepénél fog készülni.



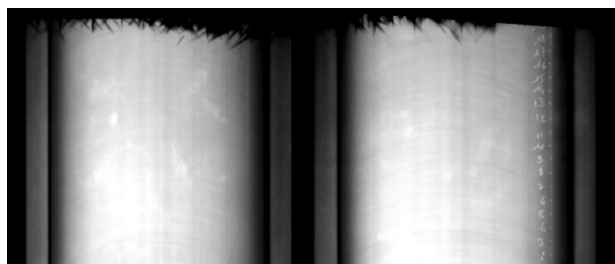
25. ábra Kamera under-triggering (saját készítésű ábra)

Végző soron be kell szintezni a lámpát, hogy az átvilágításnál a kamerával egy pontba nézzenek és beállítani a lámpa számára a megfelelő feszültséget, ugyanis különböző ellenállású minták számára különböző teljesítményű fény szükséges az átvilágításhoz. Kisebb ellenállású tömb esetén nagyobb feszültséggel, míg nagyobb ellenállás esetén kisebb feszültséggel szükséges megtáplálni a lámpát.

### Mérési eredmények

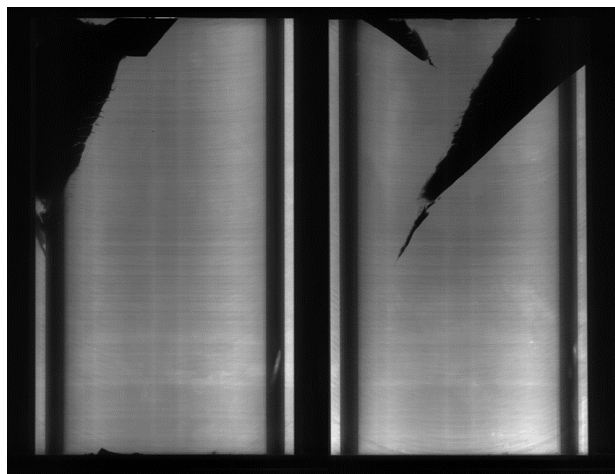
A mérőeszközök paramétereinek beállítása után a vezérlőszoftveren keresztül elindítottam a vizsgálatot két különböző mintán ugyanazokkal a beállításokkal. A mérés során a lámpa tápfeszültségét 25 V-ra állítottam és csak két oldalt mértem le a mintáknál, mivel teljesen átvilágítja a szilícium blokkot, ezért egyszerűbbnek véltem, ha csak a bal oldalról és a hátsó oldalról készül rögzített kép. Ebben az esetben a következő eredményeket kaptam.

Az első képen megfigyelhető, hogy ebben az esetben nagy volt a lámpa teljesítménye ehhez a mintához és így a tömb egyes részein túlságosan világos lett a kép, ezeken a helyeken előfordulhatnak valamilyen hibák, de így sajnos nem lehet pontosan megállapítani.



26. ábra 210-es tömb sikertelen transzmissziós képalkotása (saját készítésű kép)

A második tömb vizsgálata során, már kevésbé világos a kapott kép és jobban kivehetőek az egyes hibák. Érdekes, hogy külső szemmel nem lehetett megfigyelni, de a vizsgálat után látható egy jelentős méretű kristályosodási hiba a tömbön belül. Valamilyen oknál fogva ezeken a sötétebb területeken a kristályosodás orientációja megváltozott.



27. ábra 210-es tömb sikeres transzmissziós képalkotása (saját készítésű kép)

## 10. Fotolumineszcenciás képalkotás és töltéshordozók élettartamának mérése

A lumineszcencia az a jelenség, amely során egy külső fény hatására némelyik anyag látható fényt sugároz. Ez a jelenség szobahőmérsékleten is bekövetkezhet, tehát nem melegítés hatására jön létre. A lumineszcenciának több típusa van, az egyik ilyen típusa a fotolumineszcencia (PL).

### 10.1. Fotolumineszcencia és fajtái

A fotolumineszcencia egy anyagból a fény abszorpcióját követő fénykibocsátás. Ezt a módszert gyakran alkalmazzák a napelemiparban és a félvezetőiparban a szilícium minták vizsgálatára. Lényegében a szilícium mintát valamilyen külső fénnel gerjesztik és emiatt a mintán lévő elektronok magasabb energiaszintre ugarnak, gerjesztett állapotba kerülnek. Végül a gerjesztés megszűnése után idővel visszatér az alacsonyabb energiaszintre és visszatéréskor energiát adnak le (fotonokat szabadítanak fel). [32] A fotolumineszcenciának alapvetően két fajtája lehet foszforeszcencia és fluoreszcencia.

A *foszforeszcencia* a fotolumineszcencia azon fajtája, amely során egy anyagot külső fénnel gerjesztünk, majd a gerjesztés megszűnésével az elnyelt fényt csak egy idő után bocsátja ki és így utófényként jelentkezik. A foszforeszcens anyagok az elnyelt energiát csak egy idő után sugározzák ki, de ez viszonylag hosszú ideig is eltarthat, a körülményektől függően akár órákig is. [33]

A *fluoreszcencia* a foszforeszcenciával ellentétben a külső fény gerjesztésének hatására az anyag itt azonnal elkezd sugározni. A kezdeti gerjesztést a beeső sugárzásból vagy részecskékből például elektronokból származó energia elnyelése okozza. [33] Azonban a gerjesztés megszűnésével a fény kibocsátása ( $10^{-6}$  s) szinte azonnal megszűnik.

## 10.2. Fotolumineszcenciás képalkotás mérésének bemutatása

A technológia mai világában egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a minőségre, hiszen, ha a lehetőségek adottak, mindenki meg szeretne bizonyosodni arról, hogy a megvásárolt terméke az 100%-ban nyújtja azt, amit elvárnak tőle. A napelemgyártásban részt vevő cégek is ezt szeretnék biztosítani, hogy a termékeik a lehető legmegbízhatóbbak legyenek. Minél nagyobb teljesítményt adjanak le és minél hatékonyabbak legyenek. További igény, hogy az élettartamuk alatt minél kisebb legyen a teljesítmény csökkenésük (degradáció), amit hibák kiszűrésével tudnak elérni. Erre is szolgál a fotolumineszcenciás mérés, hogy ezeket az ígért elvárásokat könnyebb legyen betartani.

A fotolumineszcenciás képalkotás egy érintésmentes és roncsolásmentes módszer, amely kiváló lehetőséget nyújt a monokristályos és polikristályos blokkok monitorozásához. A mérés során itt nem egy halogén izzót használnak a gerjesztéshez, mint a transzmissziós képalkotás esetén, hanem egy nagyteljesítményű lézer világítja meg a szilíciumtömböt, ilyenkor a megvilágítás hatással van a töltéshordozók rekombinációjára, ha ez nem történik meg akkor ott valószínűleg valamilyen hiba áll fent. Ebben az esetben is egy infravörös vonalkamerát használunk detektorként. [34]

### 10.2.1. Szükséges fejlesztések

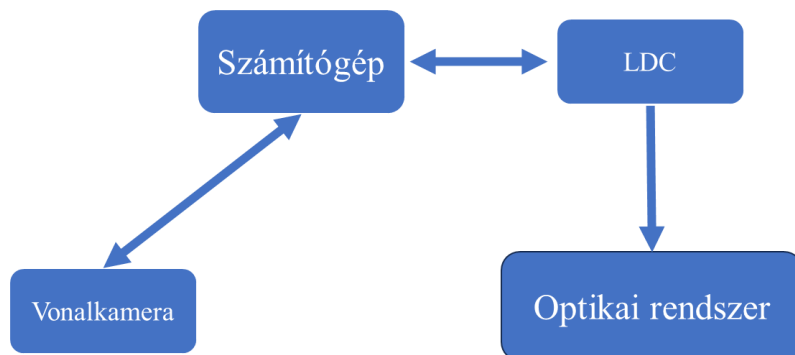
A fejlesztések szempontjából több egység is áttekintést igényelt a vizsgálandó minták méretnövekedése miatt. A korábbi 45 W-os lézerdióda helyett egy 75 W-os lézer került beépülésre, ugyanis, ha az előző 45 W-os lézerdióda fényét a nagyobb M12-es minta esetében használtuk volna, akkor a kiszélesített lézerfény egységnyi felületre jutó teljesítménye lényegesen csökkenne. Ezért volt szükség a nagyobb teljesítményű lézerdiódára.

Azonban a nagyobb lézerdióda nagyobb áramot is igényel és ez hibát okozott a készülékben. Ugyanis a használat során a korábban is alkalmazott gyári lézerdióda vezérlő csatlakozója megolvadt az új dióda nagy áramfelvételének hatására. Emiatt a Semilab kifejlesztett és megépített egy saját lézerdióda vezérlőt (LDC - Laser Diode Controller). A saját fejlesztésnek köszönhetően lehetőségünk volt a legjobb komponensek kiválasztására és a biztonság növelésére is. Az első verzióban a vezérlése saját fejlesztésű nyakkokkal volt megvalósítva, azonban, hogy felhasználóbarátabb legyen, az új verzió

vezérlése már PLC segítségével történik. Valamint a lézeres rendszer kiszélesítésére is szükséges volt, hogy a nagyobb minták teljes szélességben megvilágításra kerüljenek.

### 10.2.2. Technológiai elemek ismertetése

Lényegében a méréshez szükséges fényforrás, amely egy nagy teljesítményű lézer, egy nagy felbontású vonalkamera, a megvilágításhoz szükséges egy lézeroptika, valamint a mérőszámítógép, amellyel az egész mérőberendezést lehet konfigurálni és irányítani.



28. ábra A mérés összeállításának blokkvázlata (saját készítésű ábra)

### Lézerdióda vezérlő (LDC) felépítése

A fotolumineszcenciás képalkotás mérésének megvalósításához nem elegendő önmagában csak a lézerdióda, hanem szükséges ennek a meghajtója, vezérlése, valamint hűtése és biztonsági elemek is. Ezek egyetlen technológiai egységbe épülnek bele, amely a megfelelő fényforrást állítja elő a vizsgálatához. Az összes ilyen elemeket a lézerdióda vezérlő tartalmazza.

#### *Lézerdióda*

A fény előállítására egy nagyteljesítményű 75 W-os 980 nm hullámhosszúságú lézer áll rendelkezésre, amelyben beépített PT 1000 hőmérséklet szenzorral ellátva. Ez a lézer Class4 besorolású, elég nagy teljesítménnyel rendelkezik, hogy komolyabb sérüléseket okozzon, ezért nagyon fontos a biztonság szempontjából a különféle előírások betartása. Óvakodni kell a közvetlen lézerfényre nézéstől, ugyanis vakságot okozhat, hogy ezt elkerüljük OD7+ (950 nm és 1080 nm közötti hullámhosszra) jelzéssel ellátott biztonsági lézerszemüveg viselése kötelező a lézer állítása közben. Ugyanakkor a lézerfény láthatatlan, ezért vigyázni kell az esetleges felületekről történő visszaverődésére. Illetve bőrrel érintkezve égési sérüléseket is okozhat.

### *Lézerdióda meghajtó (LDD)*

Fontos, hogy a lézerfény a mérés során stabil és nagy intenzitású legyen a sikeres mérések érdekében, ugyanis, ha ezeknek nem tudunk eleget tenni, akkor hibás mérési eredményeket fogunk kapni. Ezért van szükség egy olyan elektronikai eszközre, amely vezérli és biztosítja a megfelelő tápellátást a lézer számára, így elérve a kívánt fényteljesítményt és megtartva a stabil fénykibocsátást. Ennek a megvalósítására egy 1000 W kimeneti teljesítménnyel és 100 A kimeneti árammal rendelkező lézerdióda meghajtó lesz segítségül.

### *Peltier hőelem*

A Peltier hőelem egy termoelektromos hűtő és fűtő eszköz, amely a lézerdióda hullámhossz stabilitását segíti elő. A vezérlése elektromos árammal működik, mégpedig az áram irányától függ, hogy ez a hőelem éppen felmelegszik vagy lehül. Nagyon megbízható és gyorsan el lehet érni a kívánt hőmérsékletet, ezáltal szinten tartva a lézerdióda stabil működését.

### *TEC*

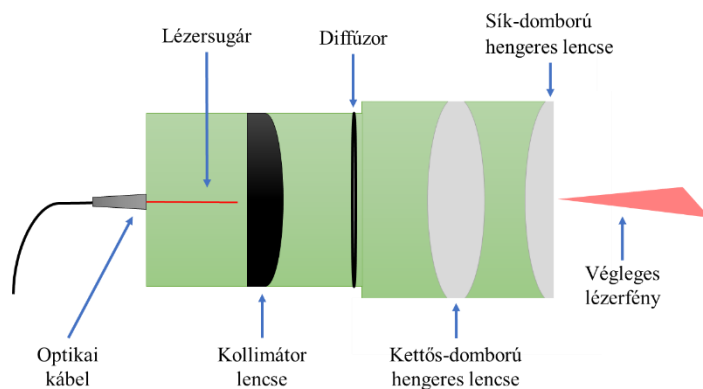
A termoelem szabályozására szükség van egy vezérlőre. Erre a legtöbbet alkalmazott és legmegbízhatóbb a TEC hőmérsékletszabályozó, ami lényegében egy nagyon összetett áramforrás a Peltier elemek számára. Az eszköz egy kétirányú szabályozható áramforrásként működik, amelynek a kimeneti árama  $0 - \pm 16$  A, attól függően, hogy hűtésre vagy fűtésre szeretnénk használni. Könnyen konfigurálható a fontosabb beállítások a saját szoftverén keresztül. A tápellátáshoz 24 V szükséges.

### *PLC*

Az egész rendszer irányítását a PLC segítségével történik. Ezzel lehet irányítani a hőmérsékletszabályozót, a lézerdióda meghajtóját, valamint ezen keresztül tudunk a számítógépen kommunikálni. A PLC-vel Etherneten keresztül tudunk kommunikálni és külön online felhasználói felületen keresztül tudunk vele módosítani az LDD beállításait, amennyiben a megfelelő IP-címet adjuk meg a böngészőszávon. Mint a TEC esetében a PLC a tápellátásához 24 V tápfeszültséget igényel, ezért szükség volt egy DC 24 V-os laboratóriumi tápegységre.

## Lézeres megvilágítás felépítése

Mivel létrehozott lézerfény csak egy pontban világítaná meg a szilícium mintát, ezért lényegében a vonalkamerával csak abban az egyetlen pontban kapánk reális képet a mintáról nem pedig a minta teljes szélességéről, így a mérés hosszadalmassá és nehézkessé válna. Ezért tökéletes lézerfény létrehozásához szükség van egy erre a célra kialakított lézeres megvilágításra, ugyanis fontos a lézerfény megfelelő alakjának előállítása. A 29. ábrán látható a létrehozott megvilágítás felépítése.



29. ábra Lézeres megvilágítás felépítése (saját készítésű ábra)

### *Optikai kábel*

A lézerfény átvitele optikai kábellel van megoldva, amellyel nagy távolságra szinte veszteség nélküli átvitelre képes. Ez kábel több kW-os lézersugarakat is képes továbbítani, valamint nagyon megbízható és a stabilitás szempontjából is tökéletes.

### *Kollimátor lencse*

Az optikai kábelből kilépő fénysugár nem teljesen párhuzamos, ugyanis a sugár különböző irányokba szétterjed. A kollimátor lencse összpontosítja és párhuzamba hozza a fénysugarat. Fontos, hogy a lencse megfelelő fókusz távolságban legyen a kilépő sugárral szemben.

### *Diffúzor*

A következőkben a diffúzor segítségével a fénysugarat egyenletesen eloszlatja és kiszélesíti.

### *Kettős-domború hengeres lencse*

A kettős-domború hengeres lencse feladata, hogy a fénysugarak ne terjedjenek tovább oldal irányban (X tengely mentén).

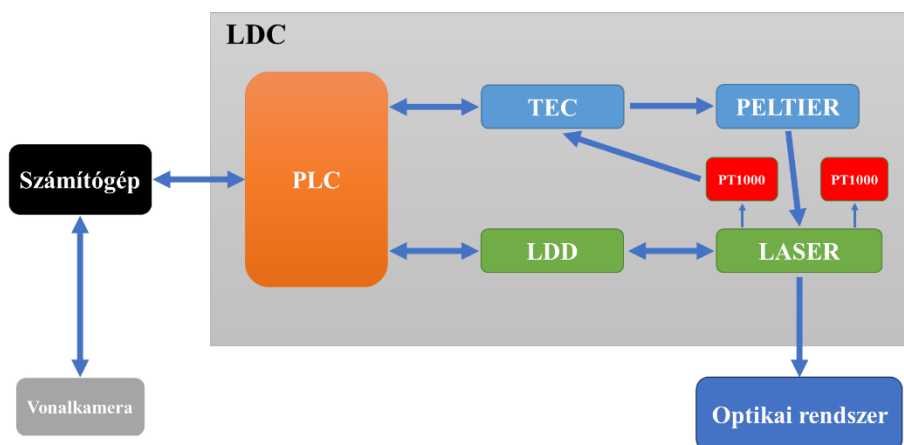
### *Sík-domború hengeres lencse*

Végül a sík-domború hengeres lencse magasságban (Z irányban) fókuszálja a fénysugarat egy vonalba, így képes a szilícium blokkot egy vonalba megvilágítani.

### **Vonalkamera**

Mivel ugyanazt a vonalkamerát használjuk itt is, mint a transzmissziós képalkotás során, így a használt kamera összeállítását és fontosabb tulajdonságait már ismertettem a 9.3. fejezetben.

A következő blokkvázlaton megfigyelhető, hogy a mérésben részt vevő elemek hogyan kapcsolódnak egymáshoz és hogyan épül fel a teljes mérés.



30. ábra PL képalkotás mérésének blokkvázlata (saját készítésű ábra)

A teljes vizsgálat lényegében a mérőszámítógép segítségével történik innen lehet elérni és irányítani a vonalkamerát és a lézerdióda vezérlőt. A vonalkamera kapcsolódása a számítógéphez a fentebb megtalálható, amelyet a 22. ábra szemléltet.

A lézerdióda vezérlőben az irányító egység, amely a teljes berendezésért felelős a PLC, így számítógépen ezen keresztül tudunk kapcsolatba lépni a berendezéssel. A számítógépről a PLC-t Etherneten keresztül tudjuk elérni. A PLC-be beépített RS-485 interfésznek köszönhetően egyszerűvé válik a kommunikáció a hőmérsékletszabályozó (TEC) és a lézerdióda meghajtó között (LDD). A meghajtó a lézerdióda anódjára és katódjára történő csatlakozással állítja be a megfelelő áramot. A hőmérsékletszabályozó a diódában lévő PT 1000-es hőmérsékletérzékelőn keresztül kapja meg a szükséges adatokat, amely PI szabályozó által állítja be a Peltier hőelem számára szükséges áramot, hogy elérjük az optimális hőmérsékletet, ezzel megkapva a stabil fénysugarat, amely a lézeres megvilágításon keresztül vetül a szilícium mintára.

### 10.2.3. Méréshez szükséges beállítások

A fotolumineszcenciás mérésnél a legfontosabb kalibráció és beállítás, amit el kell végezni az a lézer kalibráció és a kamerának a triggerelése, hiszen ezek beállítások hiányában nem leszünk képesek a minták pontos lemérésében.

#### Lézer kalibráció

A LDC-n az előzetes beállításokat és kalibrációt el kell végezni a mérőgépbe ültetés előtt, ugyanis ezáltal fogjuk tudni állítani és elérni a kívánt fényteljesítményt. Ezeket a fontosabb a beállításokat egy laptop segítségével tudjuk elvégezni.

Elsősorban a PLC-t a saját konfigurációs kábele segítségével csatlakoztatjuk a laptophoz és elvégezzük a szükséges IP-cím beállításokat az Ethernet porton. Ha ez megtörtént PLC-hez már Etherneten keresztül csatlakozunk és a laptop IP tartományát ugyanabba beállítjuk, amelyben a PLC is található. Majd a PLC számára létrehozott program megnyitása után betöltjük és futtatjuk a kódot. Továbbá a PLC-n található egy 3+1 állású kapcsoló is, amely felső állásban RUN, középső állásban (gyári beállítás) STOP, alsó állásban FW upgrade, benyomva RESET funkciót látja el. Fontos, hogy ez a kapcsoló RUN üzemmódban legyen, különben a PLC újraindítás esetén a program nem futna automatikusan. Végezetül a PLC IP címét a böngészőbe beírva elérjük az LDC személyre szabott felhasználói felületét, amely jelszóval védett, ugyanis csak megfelelő felhasználó férhet hozzá a konfigurációs beállításokhoz.

Mielőtt még bármilyen további beállítást is elvégeznénk szükségünk lesz egy platinálos fényteljesítménymérő fejre, amelyet optikai szál segítségével csatlakoztatunk a lézerdióda kimenetére. A beépített fotodiódás szenzor segítségével képes lekövetni az impulzusokat nanoszekundumos tartományban. Továbbá szükség van egy energia és teljesítménymérő eszközre, amely a teljesítménymérő fejhez egy gyári DE-9 típusú szenzor csatlakozón keresztül csatlakozik. Ez a szenzor csatlakozóban található nem-felejtő memóriában tárolja a kalibrációs adatokat és USB-vel lehet a laptophoz csatlakoztatni, ahol a mérés monitorozása történik.

A lézerciódák megfelelő működése érdekében, hogy az elvárt teljesítményt produkálja a kalibráció kezdete előtt a hőmérsékletszabályozó számára meg kell adni a helyes paramétereket. Ezek a paraméterek a 31. ábrán figyelhető meg.

The screenshot shows the SEMILAB Laser Diode Drive software interface. At the top, there are tabs for 'Inputs Outputs', 'Calibration', 'TEC16\_24' (selected), 'Simulator', and 'Settings'. The main area is divided into several sections:

- Controller state:** Radio buttons for idle, heating, cooling (selected), and error.
- Temperature OK:** Radio buttons for ok (selected) and nok.
- Temperature 1:** Display shows 24.99 °C.
- Sensor 1 state:** Radio buttons for ok (selected), fail, high, low, and over limit.
- Temperature 2:** Display shows 'Not conn.'.
- Sensor 2 state:** Radio buttons for ok, fail, high, low, and over limit.
- Heatsink temp.:** Display shows 32.77 °C.
- H.s. sensor state:** Radio buttons for ok (selected), fail, high, low, and over limit.
- Voltage TEC+:** Display shows 20.69 V.
- Voltage TEC-:** Display shows 23.88 V.
- Current TEC:** Display shows -0.55 A.

On the right side, there are two columns of parameters, each with 'Actual' and 'New' values:

- Sensor for controll:** Radio buttons for Sensor 1 (selected) and Sensor 2.
- Min. set temp.:** 10.00 °C (Actual) and 10.00 °C (New).
- Temp1&2 max diff.:** 0.00 °C (Actual) and 0.00 °C (New).
- Heating max curr.:** 8.00 A (Actual) and 8.00 A (New).
- Temp 1 high limit:** 35.00 °C (Actual) and 35.00 °C (New).
- Cooling max curr.:** 12.00 A (Actual) and 12.00 A (New).
- Temp 2 high limit:** 0.00 °C (Actual) and 0.00 °C (New).
- Proportional fact.:** 400 (Actual) and 400 (New).
- Heats. temp. limit:** 50.00 °C (Actual) and 50.00 °C (New).
- Integral fact.:** 1000 (Actual) and 1000 (New).
- Temperature set:** 25.00 °C (Actual) and 25.00 °C (New).
- Temp. slope:** 1.00 °C/s (Actual) and 1.00 °C/s (New).
- Temp OK pos limit:** 1.00 °C (Actual) and 1.00 °C (New).
- Auto enable:** Radio buttons for OFF and ON (selected).
- Temp OK neg limit:** 1.00 °C (Actual) and 1.00 °C (New).
- Controller enabled:** Radio buttons for OFF and ON (selected).
- Max. set temp.:** 30.00 °C (Actual) and 30.00 °C (New).

At the bottom, there are buttons for 'Reset TEC' and 'Factory reset TEC'. The status bar at the bottom shows 'PLC state: MANUAL MODE' and 'Log out remaining time: 112 min'.

31. ábra Hőmérsékletszabályozó paraméterek (saját készítésű kép)

A hőmérsékletszabályozó főbb paraméterei:

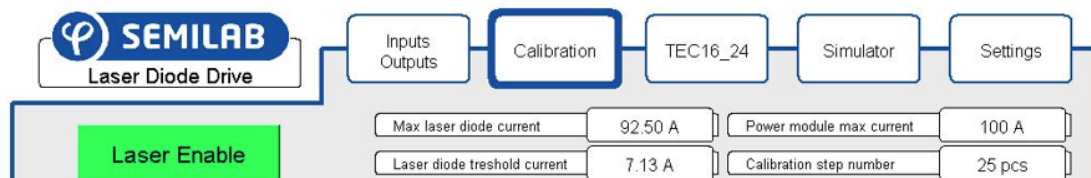
- Temp 1 high limit – A Temp 1 kritikus hőmérséklete.
- Heats. temp. limit – Hűtőborda kritikus hőmérséklete.
- Temperature set – A vezérlő ezt a hőmérsékletet fogja tartani a lézerciódán.
- Temp OK positive limit – A beállított hőmérséklettől való maximum eltérése a felső küszöbértéktől.
- Temp OK negative limit – A beállított hőmérséklettől való maximum eltérés alsó küszöbértéktől.
- Max. set temperature – Beállítható maximális hőmérséklet.
- Min. set temperature – Beállítható minimális hőmérséklet.
- Heating max current – Maximális felhasználható áram a fűtéshez.

- Cooling max current – Maximális felhasználható áram a hűtéshez.
- Auto enable – Automatikus engedélyezés az újraindítás után.
- Controller enabled – A hőmérsékletszabályozó engedélyezése.

A lézerdióda előzetes tesztelését a gyártó már elvégezte és csatolta a jegyzőkönyvét a diódához. Ebből megtudhatjuk, hogy a készülék 25 °C-on éri el a legnagyobb 75 W-os teljesítményt, ezért a beállítások ezek alapján lettek meghatározva.

A következő lépésben a kalibrációs adatokat kell megadni, amely a 32. ábrán látható az alábbi értékei a következők:

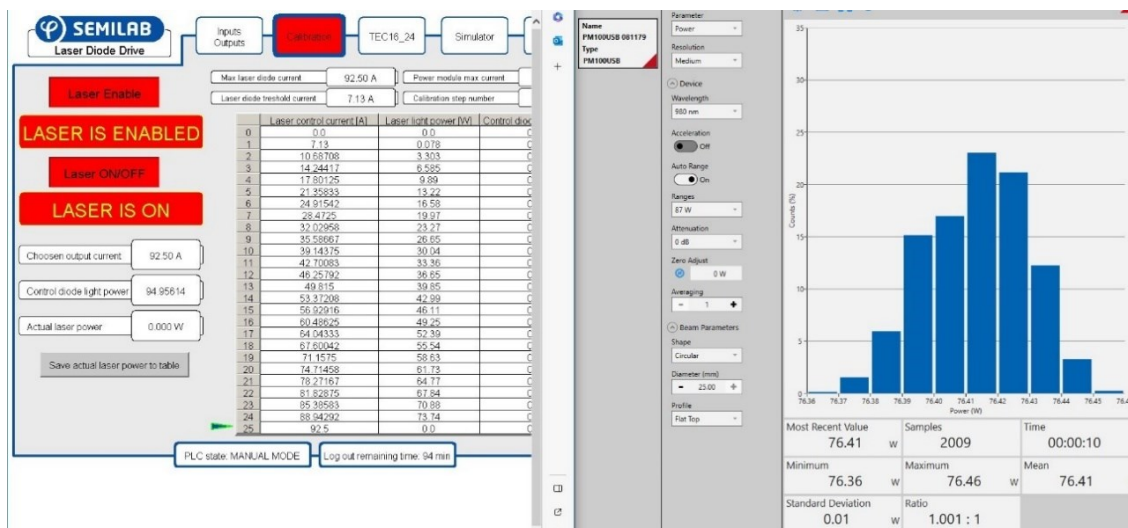
- Max laser diode current – Lézerdióda maximális árama, ahol a 75 W fénytelsítményt produkálni tudja a jelen esetben 92,5 A-nél mutatkozik.
- Laser diode treshold current – Lézerdióda nyitóárama, ahol a lézerdióda már működőképes állapotba kerül az 7,13 A.
- Power module max current – Lézerdióda meghajtó maximális árama, amely a kiválasztott eszközénél 100A.
- Calibratation step number – Kalibrációs lépések száma, ez a jelen esetben 25-re lett meghatározva.



32. ábra Lézerdióda kalibrációs paraméterei (saját készítésű kép)

Ezeket a paramétereket szintén az előzetes kalibrációs mérések, illetve a rendelkezésünkre álló eszközök adatlapja alapján lettek meghatározva. A kalibrációs lépéseket tetszés szerint lehet meghatározni, ez maximum 25 lépésből állhat. Érdeemes a nagyobb lépésszámú kalibráció beállítása, ugyanis így sokkal pontosabban lehet bekalibrálni a lézerdiódát. A Laser Enable gombra kattintva indul el a kalibráció, innentől kezdve a lézer működőképes állapotba kerül.

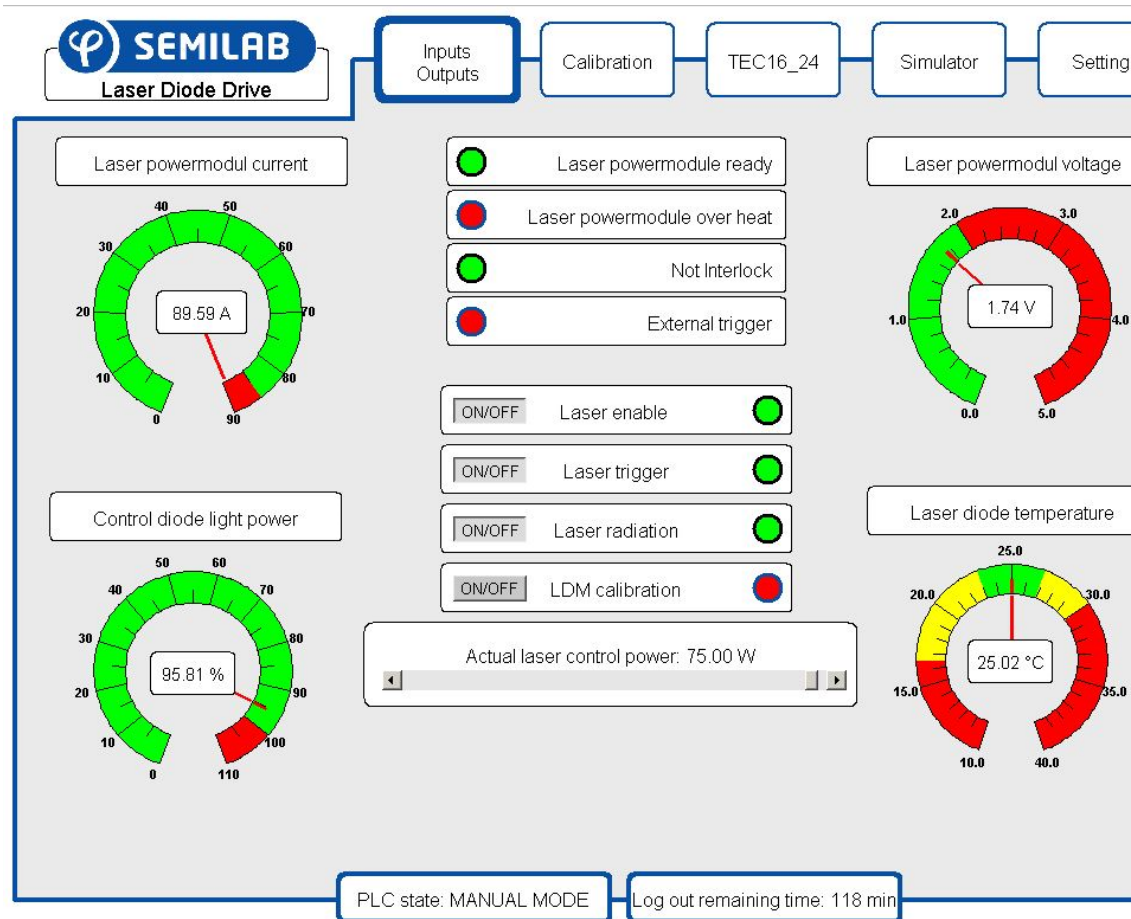
A 33. ábrán látható két kép a kalibrálás közben készült. A bal oldali képen a pillanatnyi eredményeket két oszlopba rendszerezi. Az első Laser control current oszlopban a lézergyődió pillanatnyi áramát Amperben kifejezve azt automatikusan kitöltésre kerül a lézergyődió nyitóárama, maximális árama és a mérés lépésszáma alapján. Míg a második Laser light power oszlopban a Lézergyődió által kibocsátott fényteltjesítményét jelzi Wattban, ezt azonban manuálisan kell kitölteni és erre a baloldali mintavételezési kép áll rendelkezésre. Ennél az átlagos (Mean) értéket kell beírni a jobboldali képen a tényleges lézerteltjesítmény rubrikába (Actual laser power), majd Save gombbal elmentjük, ilyenkor egyből tovább ugrik a következő lépésre és emeli az áramot a lézergyődiódán, ezzel együtt növekszik a fényteltjesítménye. Fontos, hogy az érték megadásánál a szórás (Standard Deviation) is a lehető legkisebb legyen, ami 0,01 W. Ezért fontos, hogy az egyes lépések közötti váltás ne azonnal történjen meg, mivel a teltjesítménymérő termikus elven működik, ezért minden lépésnél várni kell legalább 60 másodpercet, de ideálisabb esetben inkább 120 másodpercet mire a beállított értéket eléri. A baloldali képen látható zöld nyíl segítségünkre szolgál, hogy jelenleg melyik lépésnél tart a kalibrációs folyamat.



33. ábra Lézerdióda kalibráció (saját készítésű kép)

Ha az utolsó lépés is sikeres a program a kalibrációs adatokkal automatikusan visszaméri a lézergyődió fényteltjesítményét a meghatározott lépések alapján. Innentől kezdve tetszés szerint választhatjuk meg a kívánt fényteltjesítményt a vizsgálatokhoz. A következő oldalon a 34. ábrán a kalibrálás utáni lézergyődió paramétereit láthatjuk. A lent elhelyezkedő csúszkán lehet beállítani a kívánt teltjesítményt 0 – 75 W tartományban.

Megfigyelhető még, hogy a hőmérsékletszabályozó is szépen tartja a beállított 25 °C-ot minimális eltéréssel, de ez még elfogadható, hiszen a  $\pm 1$  °C a megengedett eltérés.



34. ábra Fényteljesítmény monitorozása (saját készítésű kép)

A kalibráció után a következő lépésben az LDC beépítettem és bekötöttem a mérőgéphez. Itt minden trigger, táp és kommunikációs kábel bekötésre került, valamint a lézertoptikához is csatlakoztatva lett az optikaiszálás kábelén keresztül.

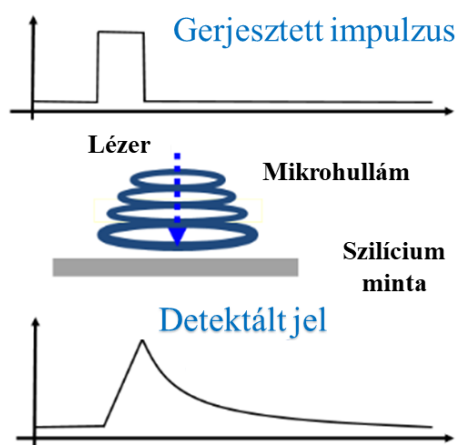
Végül lépésben a lézertoptikai eszköz színtezésére volt szükség, hogy a kibocsátott lézertény és a kamera látószöge egyazon pontba kerüljön a mintához képest. Mivel az optikai rendszer és a kamera is ugyanazon az állványon helyezkednek el, ezért további motorbeállításra nincs szükség. A kamerát is elegendő egyszer beállítani, amely a transzmissziós vizsgálatnál már beállításra került, ezért itt a továbbiakban nincs szükség más beállításra.

### 10.3. Kisebbség töltéshordozók élettartamának vizsgálata $\mu$ -PCD segítségével

Valójában a kisebbségi töltéshordozók élettartamának a mérésen azt lehet érteni, hogy egy töltéshordozó mennyi ideig marad meg mielőtt rekombinálna és ez az egyik legfontosabb paraméter, amit meg lehet állapítani a szilícium minták esetében. Ez a paraméter fogja később meghatározni a fotovoltaiikus cella hatékonyságát és tényleges élettartamát. A töltéshordozók élettartamát nehéz befolyásolni, ugyanis ez függhet készítési eljárástól, valamint a szilícium minta tisztaságától, hogy mennyire vannak benne szennyező anyagok. A szilíciumból készült napelemek esetén a töltéshordozók élettartamának az értékei lehetnek nanoszekundum vagy mikroszekundum nagyságrendűek.

#### 10.3.1. Mérés ismertetése

A mérés a Semilab Zrt. által kifejlesztett  $\mu$ -PCD (Microwave PhotoConductance Decay) mérőfejjel történik, amely a nevében is benne lévő mikrohullámú fotovezető lecsengés mérési technikát alkalmazza. A mérés során egy vonalban méri a töltéshordozók élettartamát. A lényege, hogy egy 1064 nm-es lézerfény impulzus segítségével a töltéshordozókat gerjeszti és ezeknek a hordozóknak a gerjesztés hatására megváltozik a szilícium vezetőképessége. A mikrohullámú visszaverődés érzékeny a szilícium vezetőképességének változására, így készülék által vizsgált jel a vezetőképesség csökkenését reprezentálja. Ezzel a technológiával képesek vagyunk a félvezetőben lévő szennyezett és hibás területek meghatározására. Később továbbra is alkalmazzák ezt a mérési módszert a felszeletelt waferek esetén. A 35. ábrán megfigyelhető a  $\mu$ -PCD technológiával történő mérés. [35]



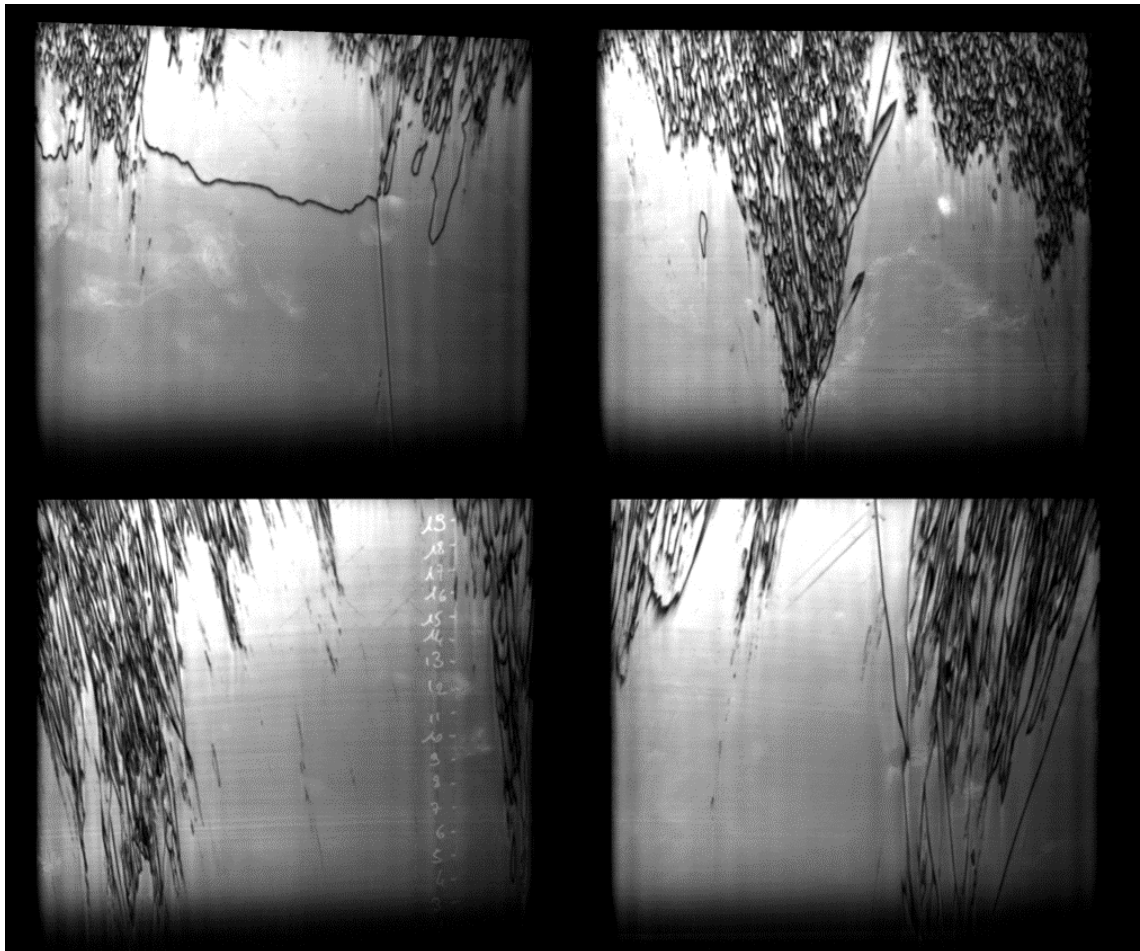
35. ábra Mérés  $\mu$ -PCD technológiával [35]

A készülék a kamera oldalánál helyezkedik el és a mikrohullámú mérés miatt ez a készülék is érzékeny a távolságra, ezért körülbelül hasonló távolságra kell helyezkednie a vizsgálat során, mint az Eddy-Probe és a PN-Tester esetén.

#### 10.4. Mérési eredmények kiértékelése

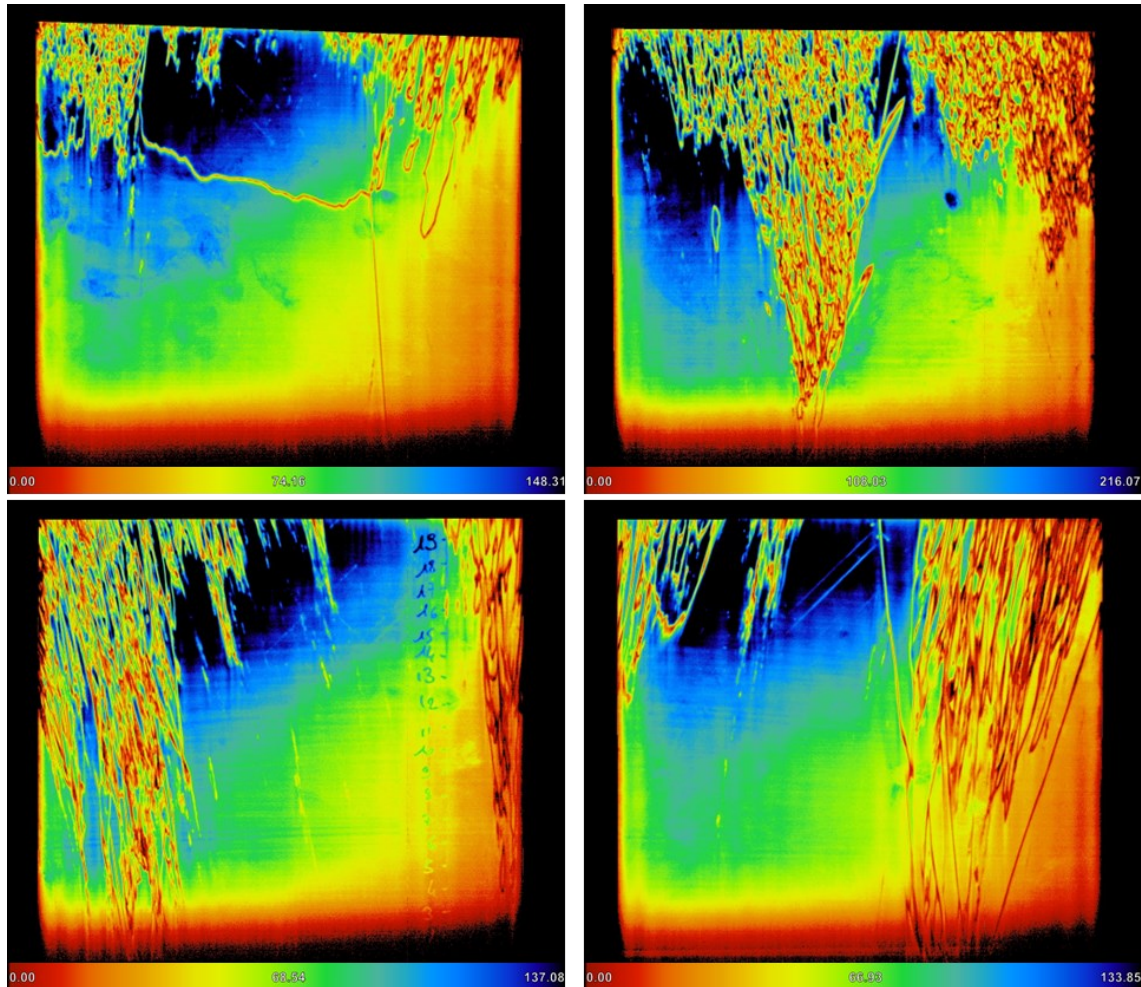
A következő képek és eredmények ugyanarról a szilícium tömbről készültek, mint amit a transzmissziós képalkotás első esetében használtam. Ennél a mérésnél már mind a 4 oldal vizsgálatára sor került, ugyanis itt nem történik meg a tömb átvilágítása.

A következő képen a fotolumineszcenciás vizsgálat során kapott eredmény látható. Megfigyelhető, hogy míg a transzmissziós vizsgálat során szabad szemmel nem sok minden volt látható, itt annál inkább. Jól megfigyelhetőek a defektek a tömbben és szinte végig terjed az egész tömbön belül, ezért itt a teljes minta gyakorlatilag használhatatlan.



36. ábra Fotolumineszcenciás képalkotás (saját készítésű kép)

Míg a következő képen a  $\mu$ -PCD-vel történő élettartammérés eredménye látható, amely során már színes képet kaptunk eredményül. Ezeket a képeket minden esetben a fotolumineszcenciás képalkotás után kapott eredményeket alakítja át a rendszer színessé és a megfelelő módon színezi be. A minden kép alján különböző színskála mutatja a megfelelő színhez tartozó élettartam értéket mikroszekundumban meghatározva.



37. ábra Élettartam mérés (saját készítésű kép)

A következő képen egy másik szilícium blokk teljes mérési eredményei láthatóak. Itt megfigyelhető hogyan rendszerezi a kapott eredményeket a mérés során a szoftver. Ez alapvetően minden minta esetén hasonlóan tekinthető meg. Az első részekben láthatjuk a szilícium minta alapvető tulajdonságait, ilyen a súlya, magassága, hőmérséklete, milyen a vezetőképességének típusa, mennyi ideig tartott a szilícium minta vizsgálata és mekkora volt a minta elfordulásának a szöge.

Továbbá rendszerzi a mért oldalanként a különféle tulajdonságokat. Megfigyelhető, hogy mennyi az egyes oldalakon keletkező hibát százalékos arányban. Az ellenállás (Resistivities), élettartam (Lifetimes), blokk méret (Block size) és a letörésének nagyságára (Chamfer size) két értéket is mutat, a legnagyobb és legkisebb mért értékeket lehet megfigyleni. Ugyanakkor még a különböző vágási vonalakat is megállapítja, amely azt szolgálja, hogy milyen pozícióban kell levágni a tömböt, hogy a felesleges részek ne kerüljenek feldolgozásra. Ezt a Lifetimes Cuts és a Resistivity Cuts sorban látható. Itt is két érték figyelhető meg, ahol az első érték a tömb pozícióját mutatja milliméterben, míg a második érték az adott pontban mért eredményeket tünteti fel. Ezeket vágási vonalakat, hogy később melyik eredményeket tartják szem előtt az minden esetben a gyártó határozza meg.

SettingsResult

Result ImagesResult TableCut Markers Table

Measurement Time [s]:141Class:None

Sample weight [kg]:12.68Quality:NaN

Estimated Height [mm]:221

Sample Angle [deg]:0.10

Sample Temperature [deg]:25.6

P/N type:PType

FrontLeftBackRight

Defect %:8.929.548.667.84

Resistivities:0.81.90.88.10.91.80.91.9

Lifetimes:40.140.842.943.643.644.563.064.1

Lifetime Cuts:218.411.5218.49.4218.417.6218.48.2

Resistivity Cuts [top/bottom]:216.527.1216.522.0216.522.0216.516.8

Block size:160.75161.22160.67161.21219.5220.5219.5220.3

Block angles:90.02689.98689.99589.993

Chamfer Size [mm]:6.046.246.436.535.385.785.285.38

38. ábra Teljes mérési eredmények (saját készítésű kép)

## 11. Fejlesztési lehetőségek

Későbbiekben a fejlesztés szempontjából új lehetőség adódhat a mérés oda-vissza működésének megvalósítására. Ugyanis a blokk mérése során mindig csak alulról kezdődik a mérés és időbe telik amíg a mintatartó visszatér az eredeti pozíciójába és a szilícium blokk aljától folytatja a mérést, ezért hatékonyabb megoldás lenne, ha a felső pozícióban lévő eszközök fentről is képesek lennének a mérésre, azonban ezek hardveres és szoftveres átalakítást is igényelnének.

Nagyobb felbontású vonalkamera kerülhet beépülésre a jobb minőségű képek készítése érdekében, amellyel még pontosabban meg lehetne állapítani a legapróbb hibákat is.

Továbbá a súlyméréséből történő a minta magasságának számítása helyett, a magasságot egy szenzor segítségével meg lehetne oldani, így sokkal pontosabb eredményeket kapnánk.

Valamint további hardveres változtatást is lehet alkalmazni, a minta geometriájának szempontjából, mégpedig át lehetne alakítani, hogy 500 mm-nél magasabb tömböket is lehessen vele mérni. Habár a jelenlegi legnagyobb méret az M12, amely 210x210 mm, de ha a technológia fejlődés is lehetővé teszi, akkor esetleg lehetne változtatni, hogy a nagyobb alapterületű tömböket is képes legyen vizsgálni.

Mint a legtöbb mérőberendezés esetén itt is szükség van fejlesztésekre a szoftver szempontjából a gyorsabb, hatékonyabb működés és az átláthatóság szempontjából. Ugyanakkor létre lehetne hozni a mérőberendezés számára egy mesterséges neurális hálózatot, amely segítségével a gyártók a saját termékeik alapján tudnák tanítani a gépet. Továbbá ennek segítségével a hibák kiértékelése is egyszerűbbé válna.

Végül az élettartam mérés megvalósítása történhetne e-PCD segítségével, amely Semilab által fejlesztett készülék és hasonló az elven működik, mint az Eddy-Probe. A különbség annyi, hogy ennek segítségével pontosabban és nagyobb tartományban lehetne kisebbségi töltéshordozó élettartamot mérni.

## 12.Összefoglaló

Szakedolgozatomat a Semilab Budapesten lévő telephelyén készítettem el, ahol felvezetőiparban használatos legújabb technológiákkal megvalósított mérő- és tesztberendezések gyártása és fejlesztése történik.

A dolgozatom során lehetőségem nyílt, hogy megismerkedjek a fotovoltaiikus cellák különféle gyártási fázisainál alkalmazott mérőberendezések működésével és felépítésével. Továbbá végig követhettem a gépeket a korai fejlesztési időszakról egészen a gyártáson keresztül, végül tesztelés és üzembe helyezésig. A mérőműszerek tesztelése közben sikerült megismernem eddig számomra ismeretlen hardver elemekkel, ezek működésével és felépítésével. Ezeknek a megértése lényeges volt, hogy a készülékek tesztelését a megfelelő beállításokkal képes legyek elvégezni. Ugyanakkor távpontot adott az összeszerelés szempontjából is.

Az első részekben bemutattam a napelemiparban leginkább használatos fotovoltaiikus cella típusait, ezeknek az egyes előnyeit és hátrányait. Azonkívül kitértem, miképpen történik a cellák gyártási folyamata és miért kulcsfontosságú az egyes lépések között a termékek permanens vizsgálata.

Későbbiekben bemutatásra került a fejleszteni kívánt mérőberendezés, amellyel később a dolgoztam elkészítése során foglalkoztam. A gépnél megemlítsre került, hogy melyik gyártási fázisban használják és milyen módszerrel vizsgálják a mintákat, valamint rávilágítottam a fejlesztések jelentőségére. Ezekkel a végrehajtott változtatásokkal az eddigi minták mellett most már képesek vagyunk a nagyobb méretű minták vizsgálatára is.

Végző soron kitértem a különböző méréseket elvégző részegységek működésére, fontosabb beállításaira és az egyes részeknél történő fejlesztésekre is. Utólag a különböző mérési fázisoknál kapott mérési eredményeket feldolgoztam és kiértékeltem. Sikerült megfigyelni a hardver elemek, mint például szenzorok, meghajtók, vezérlők, állapotjelzők szimultán működését és az egyes elemek közötti kommunikációs hálózat felépítését.

### 13.Summary

I prepared my thesis at Semilab company in Budapest, where the production and development of measurement and test equipment using the latest technologies in the field of semiconductor industries.

During my thesis I had my opportunity to learn about the operation and construction of the measuring equipment used in the different production phases of photovoltaic cells. Furthermore I was able to follow the machines from the early development phase, through the production, to the final testing and commissioning. In the course of the testing measuring instruments, I was able to familiarise myself with previously unknown hardware components, their operation and construction. Understanding these was essential to be able to test the instruments with the right settings. At the same time, it also provided a point of reference for assembly.

In the first parts, I presented the most common types of photovoltaic cells used in the solar industry, their advantages and disadvantages. I also explained how the production process of cells is carried out and why permanent testing of the products between each step is crucial.

Later on, the measuring equipment to be developed was presented, which I later dealt with during the preparation of my thesis. I mentioned the machine, the stage of production at which it is used and the method used to test the samples, and highlighted the importance of improvements. With these changes we are now able to test larger samples in addition to the existing samples.

Finally, I also covered the operation of the various components that perform the measurements, their main settings and any improvements that might be made. Afterwards, I processed and evaluated the measurement results obtained for the different measurement phases. I was able to observe the simultaneous operation of hardware components such as sensor, drives, controllers, status indicators and the structure of the communication network between the components.

## Ábrajegyzék

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra Polikristályos szilícium wafer és szilícium blokk (saját készítésű kép) .....   | 10 |
| 2. ábra Napelem működése [4] .....                                                      | 12 |
| 3. ábra Tiszta szilícium előállítása kvarcból [11].....                                 | 13 |
| 4. ábra Monokristályos szilícium seed és ingot (saját készítésű kép).....               | 14 |
| 5. ábra Szilícium blokk (saját készítésű kép).....                                      | 15 |
| 6. ábra Monokristályos szilícium wafer (saját készítésű kép) .....                      | 16 |
| 7. ábra Textúrált felületi különbségek (saját készítésű ábra) .....                     | 17 |
| 8. ábra Fotovoltaikus cella első és hátsó oldala (saját készítésű kép).....             | 18 |
| 9. ábra Fotovoltaikus cella méretek [38] .....                                          | 19 |
| 10. ábra Szilícium blokk tesztelő mérőgép [19] .....                                    | 20 |
| 11. ábra Szilícium blokk komplex mérése (saját készítésű ábra) .....                    | 21 |
| 12. ábra Slug vizsgálata (saját készítésű ábra).....                                    | 23 |
| 13. ábra Magasság beállítás (saját készítésű kép).....                                  | 27 |
| 14. ábra Ellenállás mérése Eddy árammal (saját készítésű ábra) .....                    | 28 |
| 15. ábra Config fájl létrehozása (saját készítésű kép).....                             | 30 |
| 16. ábra Ellenállásmérés eredmények (saját készítésű kép) .....                         | 31 |
| 17. ábra Részlet a PN mérés eredményeiből (saját készítésű kép) .....                   | 34 |
| 18. ábra Transzmissziós képalkotás (saját készítésű ábra) .....                         | 36 |
| 19. ábra Infravörös fényforrás felépítése (saját készítésű ábra).....                   | 37 |
| 20. ábra Kamera felépítése (saját készítésű ábra) .....                                 | 38 |
| 21. ábra Kamera csatlakozói [30] .....                                                  | 39 |
| 22. ábra Kamera kommunikációjának blokkvázlata (saját készítésű ábra) .....             | 40 |
| 23. ábra Mintatartó mozgatásáért felelős egység paraméterei (saját készítésű kép) ..... | 42 |
| 24. ábra Kamera over-triggering (saját készítésű ábra) .....                            | 43 |
| 25. ábra Kamera under-triggering (saját készítésű ábra) .....                           | 43 |
| 26. ábra 210-es tömb sikertelen transzmissziós képalkotása (saját készítésű kép) .....  | 44 |
| 27. ábra 210-es tömb sikeres transzmissziós képalkotása (saját készítésű kép).....      | 44 |
| 28. ábra A mérés összeállításának blokkvázlata (saját készítésű ábra).....              | 47 |
| 29. ábra Lézeres megvilágítás felépítése (saját készítésű ábra).....                    | 49 |
| 30. ábra PL képalkotás mérésének blokkvázlata (saját készítésű ábra).....               | 50 |
| 31. ábra Hőmérsékletszabályozó paraméterek (saját készítésű kép) .....                  | 52 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 32. ábra Lézerdióda kalibrációs paraméterei (saját készítésű kép) ..... | 53 |
| 33. ábra Lézerdióda kalibráció (saját készítésű kép).....               | 54 |
| 34. ábra Fényteljesítmény monitorozása (saját készítésű kép) .....      | 55 |
| 35. ábra Mérés $\mu$ -PCD technológiával [35] .....                     | 56 |
| 36. ábra Fotolumineszcenciás képalkotás (saját készítésű kép) .....     | 57 |
| 37. ábra Élettartam mérés (saját készítésű kép) .....                   | 58 |
| 38. ábra Teljes mérési eredmények (saját készítésű kép) .....           | 59 |

## Hivatkozásjegyzék

- [1] <https://hu.dsnsolar.com/info/single-crystal-silicon-growth-and-properties-55613362.html> (2023.09.04.)
- [2] <https://loma.info.hu/index.php/villamossagtan/elektronika/12-szennyezese-s-felvezetok> (2023.10.02.)
- [3] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure> (2023.10.02.)
- [4] <https://napfeszultseg.hu/napelemek.html> (2023.10.02.)
- [5] <https://www.tme.eu/hu/news/library-articles/page/53249/fotovoltai-kus-pv-modu-lok-a-fotovoltai-kus-cellak-mukodesi-elve/> (2023.10.03.)
- [6] <https://www.napelemek-napkollektorok.hu/magazin/napenergia/napelemes-rend-szer-ek-egy-kristalyos-polikristalyos/> (2023.10.03.)
- [7] <https://bestsolar.hu/melyik-a-legjobb-napelem/> (2023.10.03.)
- [8] <https://innovativnapelem.hu/polikristalyos-napelem.html> (2023.10.03.)
- [9] <https://www.eu-solar.hu/blog/monokristalyos-vagy-polikristalyos-napelem/> (2023.10.03.)
- [10] <https://innovativnapelem.hu/monokristalyos-napelem.html> (2023.10.03.)
- [11] <https://hu.dsnsolar.com/info/silicon-wafer-production-49756192.html> (2023.10.03.)
- [12] <https://sinovoltaics.com/solar-basics/solar-cell-production-from-silicon-wafer-to-cell/> (2023.10.03.)
- [13] <https://hu.dsnsolar.com/info/cz-czochralski-monocrystalline-silicon-solar-49812660.html> (2023.10.03.)
- [14] <https://www.addisonengineering.com/about-silicon.html> (2023.10.11.)
- [15] <https://www.reliableplant.com/Read/13425/slicing-solar-power-costs-with-new-wafer-cutting-method> (2023.10.11.)
- [16] <https://solarexperts.hu/blog/hogyan-keszul-a-napelem> (2023.10.11.)
- [17] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/p-n-junction-diodes> (2023.10.11.)
- [18] Muttnyánszky Ádám: Szilárdságtan. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1981
- [19] <https://semilab.com/hu/product/764/plb-55-photoluminescence-silicon-block-imaging-system> (2023.10.31.)
- [20] <https://semilab.com/category/products/tco-sheet-resistance> (2023.10.31.)
- [21] <https://semilab.com/category/products/pn-type-determination> (2023.10.31.)
- [22] <https://www.admesy.com/articles/what-are-transmission-measurements/> (2023.10.31.)

- [23] <https://www.linshangtech.com/tech/how-to-detect-the-transmittance-of-materials-with-transmission-meter-tech1192.html> (2023.10.31.)
- [24] <https://semilab.com/category/products/infrared-block-imaging> (2023.11.02.)
- [25] <https://hu.rs-online.com/web/p/melegito-lampak/7960246> (2023.11.02.)
- [26] <https://www.ecoptik.net/products/silicon/> (2023.11.02.)
- [27] <https://www.fresneltech.com/diffusers> (2023.11.02.)
- [28] <https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/ingaas-sensors-the-basics> (2023.11.02.)
- [29] <https://www.sensorsinc.com/products/detail/1024-ldm-linescan-camera> (2023.11.02.)
- [30] [https://www.sensorsinc.com/images/uploads/documents/4110-0250\\_Rev\\_E\\_Manual\\_LDM\\_LDH2\\_Linescan\\_Cameras.pdf](https://www.sensorsinc.com/images/uploads/documents/4110-0250_Rev_E_Manual_LDM_LDH2_Linescan_Cameras.pdf) (2023.11.02.)
- [31] <https://www.automate.org/a3-content/vision-standards-camera-link> (2023.11.02.)
- [32] <https://www.edinst.com/us/blog/photoluminescence-differences/> (2023.11.03.)
- [33] <https://www.britannica.com/science/phosphorescence> (2023.11.03.)
- [34] [https://semilab.com/category/products/blocks-photoluminescence-imaging?search\\_string=photoluminescence%20imaging](https://semilab.com/category/products/blocks-photoluminescence-imaging?search_string=photoluminescence%20imaging) (2023.11.09.)
- [35] [https://semilab.com/category/products/u-pcd-carrier-lifetime-for-wafers?search\\_string=lifetime%20measurement](https://semilab.com/category/products/u-pcd-carrier-lifetime-for-wafers?search_string=lifetime%20measurement) (2023.11.09.)
- [36] [https://semilab.com/about\\_us](https://semilab.com/about_us) (2023.11.12.)
- [37] <https://semilab.karrierportal.hu/> (2023.11.12.)
- [38] <http://www.solarblogger.net/2021/03/pv-cell-formats-and-size-guide.html> (2023.11.17.)
- [39] Jenny Nelson: The physics of solar cells, Imperial College Press, London, 2003
- [40] <https://agisys.hu/hirek/encoder-hasznalata-a-hajtastechnikaban-255> (2023.11.12.)