



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Villamosmérnöki és Informatikai Kar**

**Elektronikus Eszközök Tanszéke**

## **Napelemek Laboratórium**

### **Szerda délutáni csoport**

Hallgatók:

Gunics Endre,  
Kello Klaudia Linett,  
Kovács Máté,  
Marosi Csaba Zoltán,  
Pap Gábor,  
Vida Imre

Mérésvezetők:

Plesz Balázs,  
Rózsás Gábor,  
Neumann Péter,  
Tóth-Blum Adél

BUDAPEST, 2022.05.04.

# Bevezetés

A tárgy és a mérések célja, hogy az Elektronikus Eszközök Tanszékén elérhető technológiai eszközökkel működő napelemcellákat készítsünk, és közben megismerjük a szilícium napelemek működését, gyártástechnológiáját és mérés technikáját, ezen belül is a szilícium megmunkálás lépéseit, kontaktusfémezést, darabolást, modulba szerelést és bemérést.

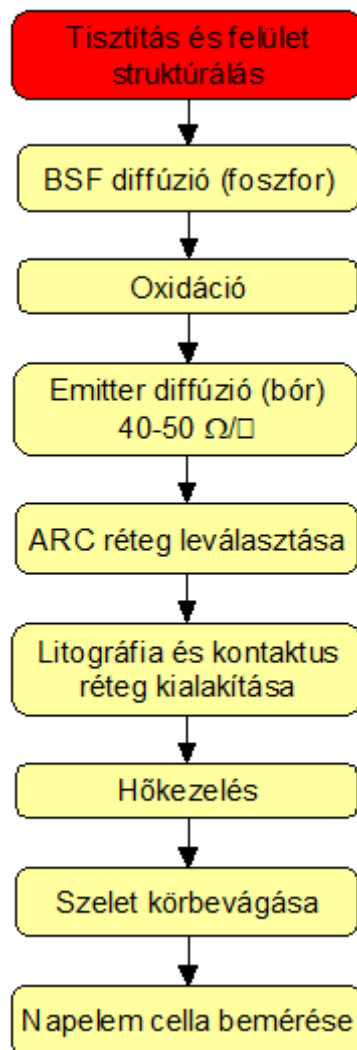
A szilícium napelemek működése arra épül, hogy az adalékolással kialakított p-n átmenetet érő és a tiltott sáv szélességét meghaladó energiájú fotonok a rácsatomokat gerjesztik, így a félvezetőben elektron-lyuk párok generálódnak, amiket az átmenet beépített villamos tere szétválaszt, így a kivezetések között áram folyik, a napelemből teljesítmény vehető ki.

A gyakorlat első részét tisztatérben végeztük el, hogy a szennyeződésekre érzékeny technológiai lépések során ne rontsuk el a napelemeinket. Az EET laborjában egy ISO-7 illetve egy ISO-6 osztályú helyiség található.



*A csoport tagjai az EET ISO-7 osztályú tisztatérében*

## 1. alkalom (03.09.)



*Hallgatői napelem technológiai lépései*

Az első alkalommal a szilícium szeleteket tisztítottuk meg, majd pedig savval elvégeztük a felület struktúrálást.

A mérést balesetvédelmi tájékoztató előzte meg, ahol ismertették velünk a veszélyes vegyületeket és tisztáztuk, hogy melyik feladatokat végezhetjük majd mi. Majd a tisztatérben gyakoroltuk a csipesz használatát, ezután pedig 4 szeletet RCA1 (75..80 °C, 15 perc, 5:1:1 DI H<sub>2</sub>O : NH<sub>4</sub>OH : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) oldattal megtisztítottunk (utána háromszori öblítés, centrifugás szárítás), majd III/1-4 jelzéssel láttunk el, jelezve, hogy a csoportunkhoz tartoznak ezek a szeletek.

A III/4 szeletet kettétörtük, hogy legyen egy kísérő szeletünk, amelyen később majd megvizsgálhatjuk, hogy hogyan sikerült a felületstruktúrálás, illetve később az adalékolás. A szelet törésénél figyelembe vettük a kristálysírk orientációját, így annak megfelelően megkarcolva a szelet közepén, egyenes vonal mentén tört el a szelet.

A III/1-3 szeleteket, illetve a kísérő szelet egyik felét izotróp marásnak (70ml HF, 20 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml CH<sub>3</sub>COOH, 45s) vetettük alá (felületstrukturálás), a visszaverődés csökkentése céljából (utána háromszori öblítés, centrifugás szárítás). Azért szükséges a felület strukturálás, hogy a cella hatásfokát, növeljük. A strukturálásnak a lényege, hogy a fotonokat csapdába ejtsük, több idejük legyen a rekombinációra. Tulajdonképpen a szilícium szelet felületét érdesítettük, növeltük.

A szeleteket optikai mikroszkóppal vizsgáltuk, majd megmértük a vastagságukat. Marás előtt a szeletek vastagsága 346 µm, utána 305 µm, tehát 45s alatt 20,5 µm-t martunk le mindkét oldalról, a marás sebessége tehát **0,46 µm/s**.

## 2. alkalom (03.16.)

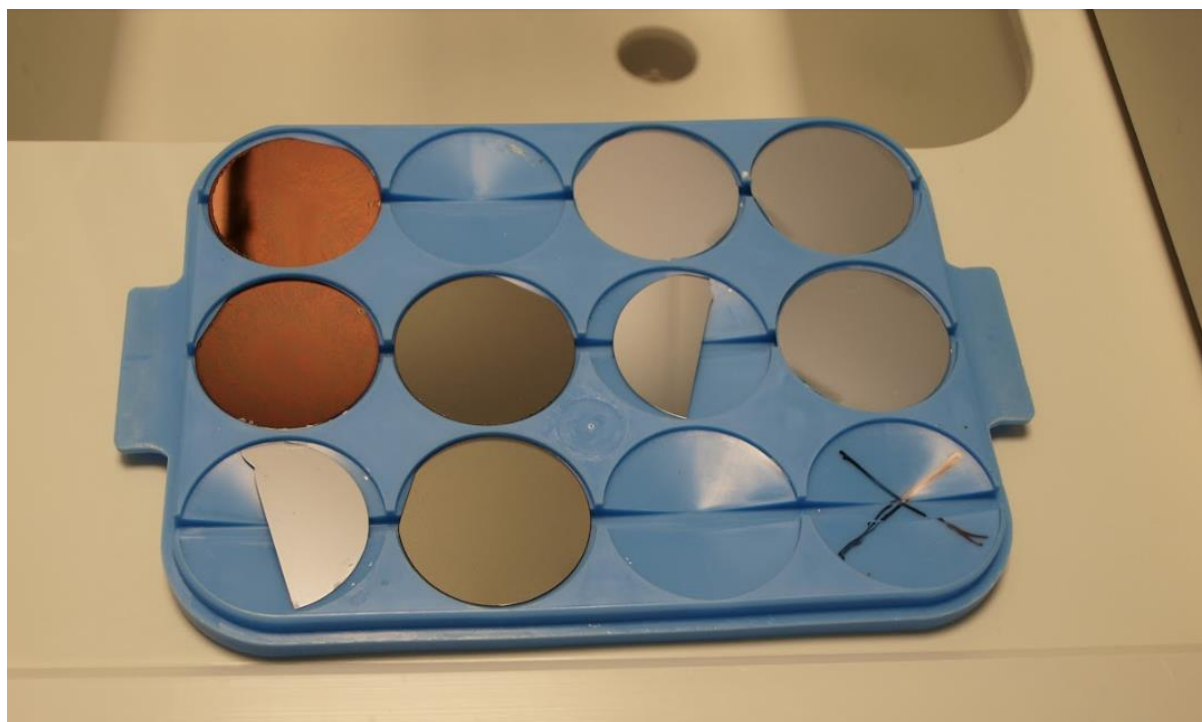
A második alkalom során szilícium dioxid réteget növesztettünk, amelyhez a kályhákat használtuk. A mérés során három darab egész szelettel és egy darab polírozott félszelettel dolgoztunk.

Először megtisztítottuk a szeleteket RCA2 oldattal. A szilícium szeleteket 75-80°C között hidrogén peroxid és sósav vizes oldatába helyeztük, majd 15 percig tisztítottuk. Ahhoz, hogy az oldatot 75-80°C tudjuk tartani, a hot plate-et használtuk, amelyet 285°C-ra állítottuk be. Ezt korábbi kísérletek tapasztalatai alapján határozták meg a mérésvezetők.

Ezt követte a szokásos tisztítása a szeleteknek, háromszori öblítése, majd szárítás.

A következő feladatunk az oxidáció elvégzése volt, amelyhez a hetes kályhát használtuk. A szeleteket behelyeztük egy csónakban és a nyolcas pálcával egyenletes sebességgel igyekeztünk beoltni. Minimum három percig kellett tartania, egy ilyen betolás, kihúzás műveletnek, hogy a szeletek a hirtelen hőváltozásra ne sérüljenek, esetlegesen el ne pattanjanak. A kályhát kb 1100 °C-ra hevítettük fel, és az oxidáció hetven percig tartott.

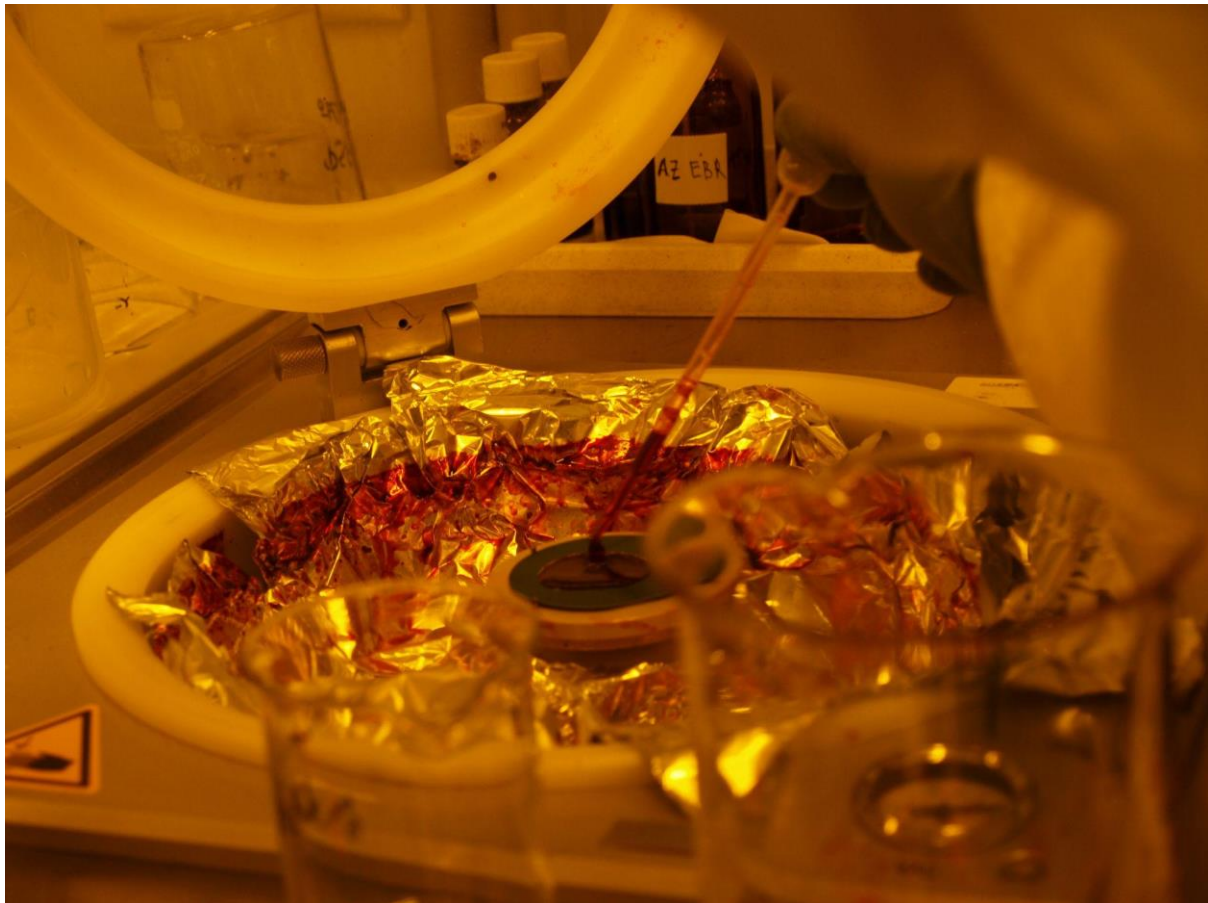
Ezután megfigyelhető volt egy színváltozás a szeleteken, ami az oxidáció mértékét mutatta.



*Szilícium szeleteink az oxidáció után*

### 3. alkalom (03.23.)

Először lakkréteggel (AZ1505) láttuk el a szilícium szeleteket, amelynek azért van jelentősége, hogy a későbbi folyamat során megvédjük őket a maratástól. 2000 RPM fordulatszámmal pörgettük fel a lakkot a szeletekre.



*Fotoreziszt lakk felvitele cseppentéssel majd pörgetéssel*

Miután megszáradt a lakkréteg, lemarattuk az oxid réteget pufferelt oxidmaróval (hidrogénfluorid és ammónium fluorid oldata) 1.5 perc alatt. Pufferelés: az oldat a sav maradéksóját is tartalmazza, amiből a sav pótlódni tud, így állandó marad a sav koncentrációja, állandó marási sebességet tudunk tartani, nem kell minden marás után kiönteni.

Ellenőriztük, az oxid réteget mennyire sikerült lemaratni. (Ha vízbe tesszük a szeletet, az oxidhoz tapad a víz, míg az elemi szilícium taszítja, így észrevehetők esetleges hibák, ahol nem sikerült lemaratni az oxidot.)

Majd a lakk lemaratása következett, acetonnal, ez az oldószere a AZ1505-ös lakknak. Pár körkörös mozdulattal áztattuk le. Két pohárban (koszos, tiszta aceton) áztattuk, majd tiszta izopropil-alkohollal lemostuk az acetont. Tiszta vízzel öblítettük



és centrifugával szárítottuk a szeleteket. A lakk apró maradványait 5 perc piranha-oldatos marással távolítottuk el, majd ismét öblítettük és szárítottuk a szeleteket.

Folyékony oldatból foszfor-oxid adalékforrást vittünk fel a szeletekre spincoaterrel, majd (3 perc alatt) behelyeztük őket a 4-es kályhába 900°C-ra, 15 percig Nitrogén-Oxigén, majd 5 percig tiszta Oxigén atmoszférába, hogy a foszfor bediffundáljon a szilíciumba (állandó felületi koncentrációjú diffúzió). 3 perc alatt eltávolítottuk a szeleteket a kályhából.

A foszforüveget lemarattuk pufferelt oxidmaró oldattal (10 perc alatt), majd öblítettük, szárítottuk. 3 perc alatt betöltük őket a 900°C-os kályhába (Oxigén atmosféra), 15 perc alatt behajtottuk a foszfort, majd 3 perc alatt kihúztuk őket. Szelettartóba helyeztük őket.



*Szilícium szeletek marása pufferelt oxidmaró oldattal*

## 4. alkalom (03.30.)

Gyakoroltuk a fotoreziszt lakk felvitelét.

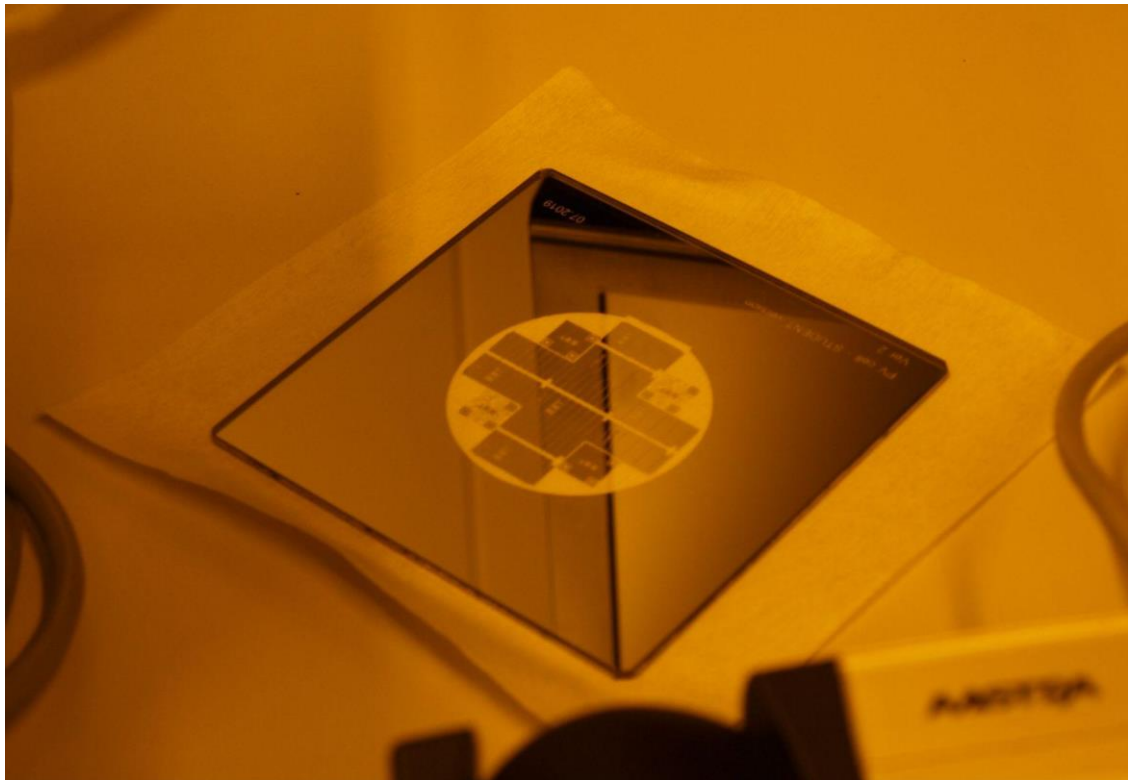
A szeleteket (3db szelet az előző alkalomról, illetve egy kísérő félszelet) dehidratáltuk, majd PL177 lakkal vontuk be (spincoater segítségével). Ezt követően felhelyeztük őket a hot plate-re 100°C-on 50s-re, hogy a lakk oldószere elpárologjon.



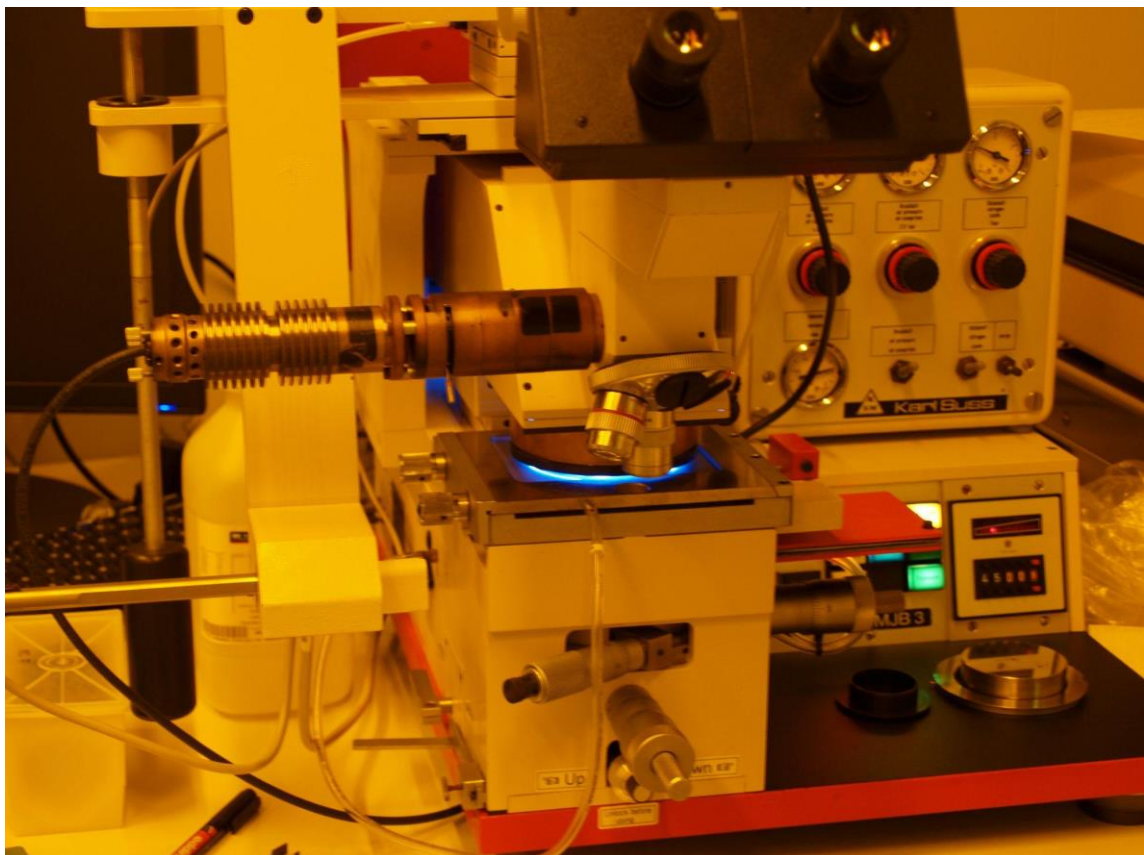
*Lakk beégetése a szilícium szeletekre*

A napelem fémezéshez tartozó maszkokat megtisztítottuk acetonnal, majd izopropil-alkohollal. Az 5 cellához való maszkot felhelyeztük a maszkillesztőre, majd pozícionáltuk és levilágítottuk 2 szeletre (45s expozíció, UV fény). A harmadikhoz a 4 cellához való maszkot használtuk. A PL177 pozitív reziszt, tehát ahol a szeletet fény éri, ott lesz a lakk oldható. Az előhíváshoz MIF-726 előhívó oldatot használunk 2 percen át, majd vízzel öblítettük és centrifugában szárítottuk a szeleteket.





*Litográfiához használt króm-maszk*

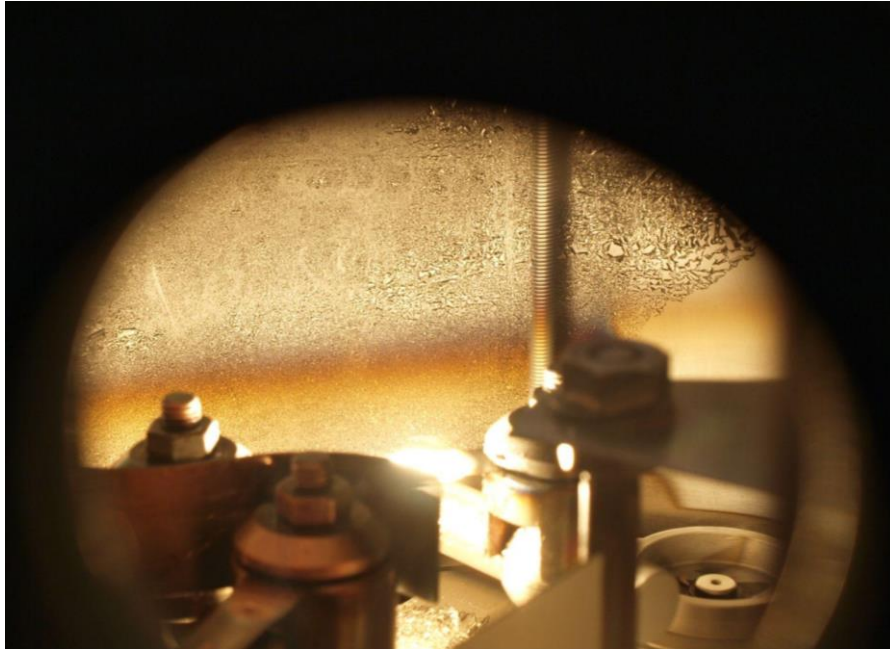


*A fotoreziszt lakk levilágítása a maszkon át*

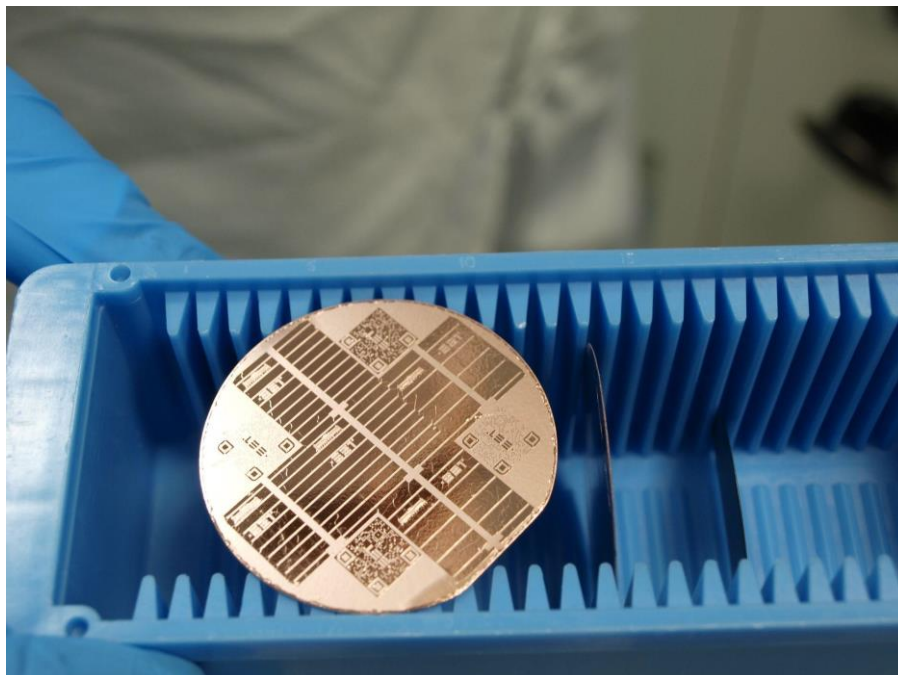
A szeletekről pufferelt oxidmaró oldattal 2 perc alatt lemarattuk az oxidot (ott fahol a reziszt oldhatóvá vált a fénytől, az oxid szabadon van, mindenhol máshol védi a reziszt). Háromszori öblítés, centrifugás szárítás.

Vákuumgőzöléssel titánt, majd rezet vittünk fel a mintázott felületre.

Titán vastagság : 74,65 nm                      Réz vastagság: 150 nm



*Vákuumgőzölés folyamata*

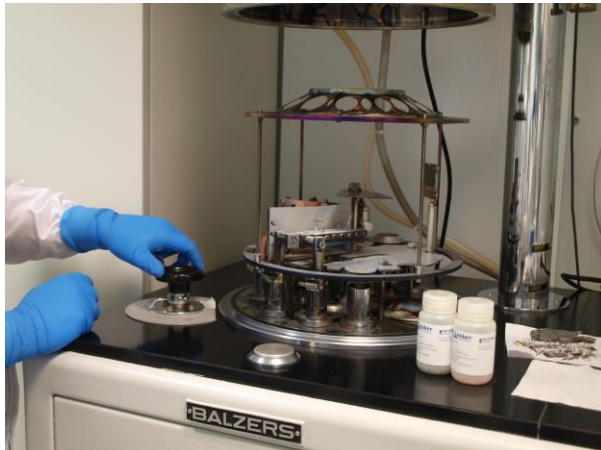


*Szeleteink a vákuumgőzölés után*

Lift-off eljárás. A rezisztet acetonnal, majd alkohollal eltávolítottuk (ultrahanggal segítettük), vele a nemkívánatos fém is levált a felületről. Az egyik 5 cellás szeleten a litográfia nem sikerült olyan jól.

A hátoldali fémréteget hasonlóan gőzöltük:

Hátoldali titán:	104,94	nm
Hátoldali réz:	154,46	nm

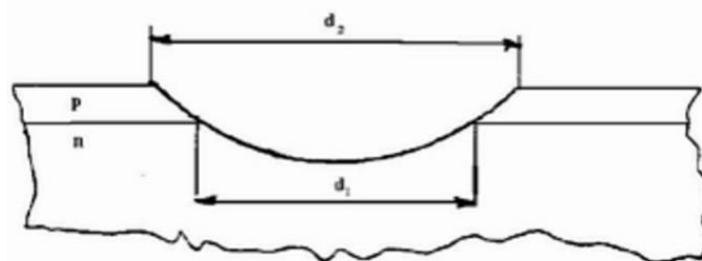


*Szeletek behelyezése a vákuumgőzölőbe.*

## 5. alkalom (04.06.)

A felvitt réz réteg vastagságát galvanizálással növeltük. A galvanizálást víz, kénsav, réz-szulfát oldatban végeztük. A galvanizálás elsőre nem sikerült, mert az oldat hibás volt. Az oxidáció elkerülése érdekében kémiai ónozó oldat segítségével ónnal vontuk be a szeleteket.

Következő lépésben meghatároztuk a p-n átmenet vastagságát. Először egy gyémántsztár csapágygolyóval csiszoltuk meg a szeleteket több helyen, majd ezüst-nitrát oldat és megvilágítás segítségével "előhívtuk" az átmenetet, aminek a vastagságát mikroszkóppal határoztuk meg.

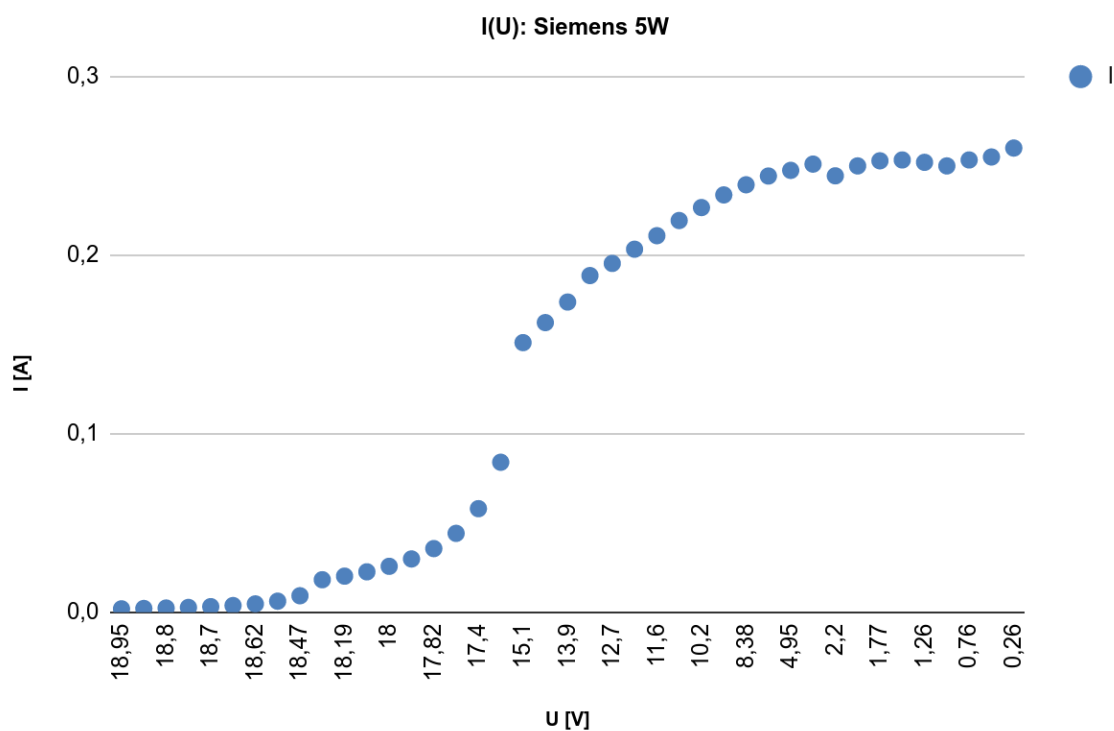


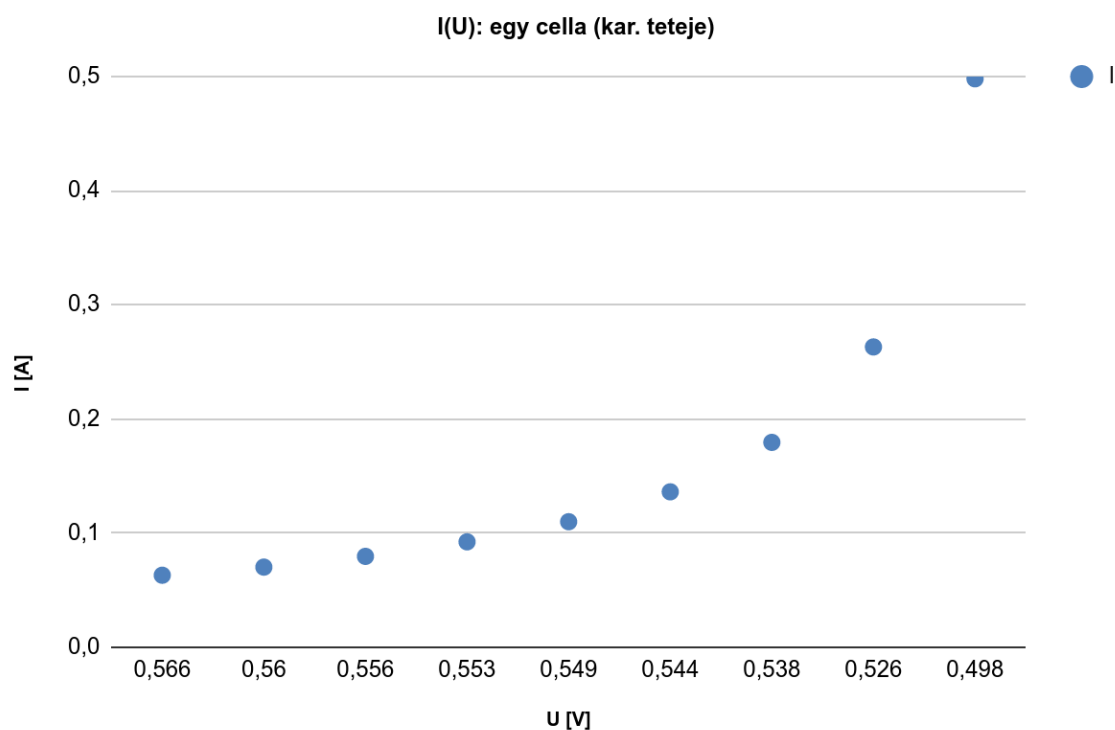
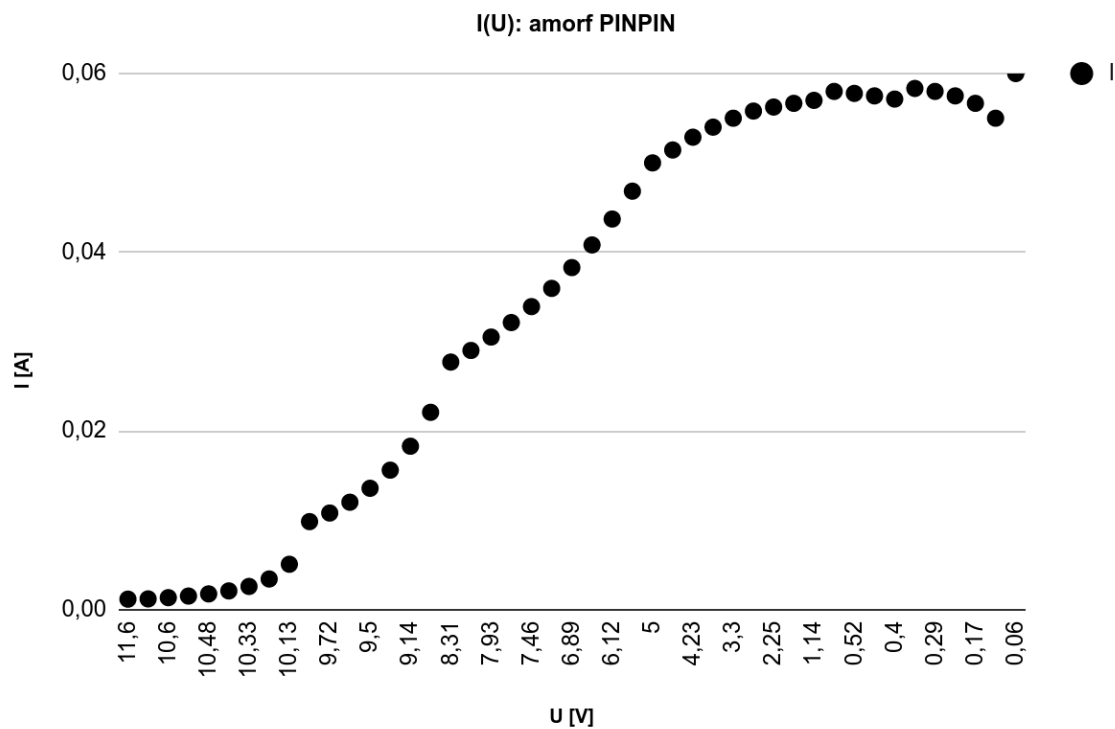
*A gömbcsiszolatos átmenet-vastagság mérés geometriája*

## 6. alkalom (04.27.)

A szeleteket először feldaraboltuk. Ehhez egy automata gyémántkorongos vágógépet használtunk. A szeletet egy fóliára ragasztottuk, majd a fóliát vákuummal a tárgyasztalhoz rögzítettük. Ezek után a gépben lévő nagy felbontású kamerával pozícionáltuk a szeletet és kijelöltük a vágási vonalakat, majd a gép elvégezte a vágást.

Kipróbáltuk a napelemek kézi bemérését néhány gyári panelen, egy nagy teljesítményű (400W) fényforrással és egy ellenállás dekáddal. A dekádott 0 és 10000 Ohm között változtattuk, nem egyenlő beosztással. Ez a napelem jelleggörbe alakja miatt van (0 és 10  $\Omega$  között kb. 1-esével, 10 és 100  $\Omega$  között kb. 10-esével). Az eredmények az alábbi grafikonokon láthatóak (Siemens 5W egykristályos modul, amorf-szilícium PINPIN struktúrájú modul, majd egy cella az általunk készítették közül):

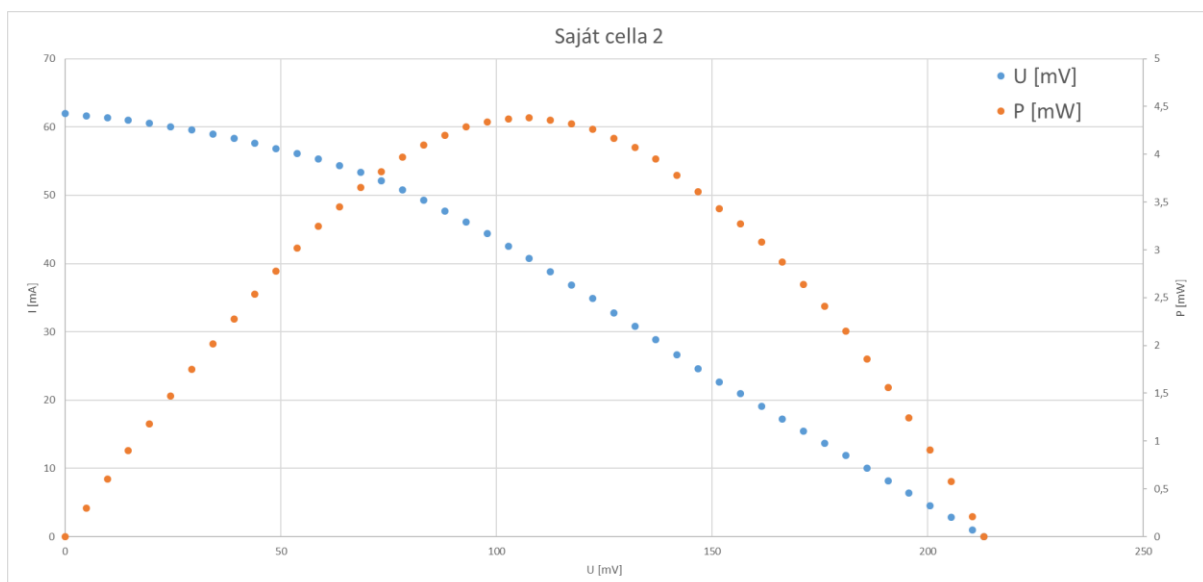
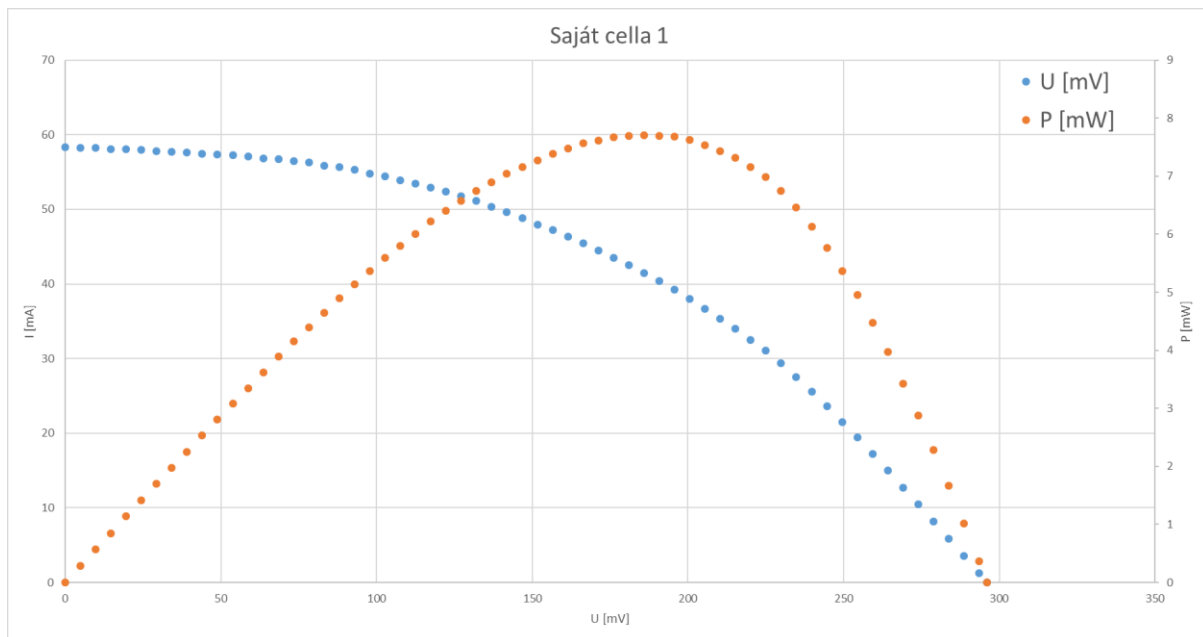


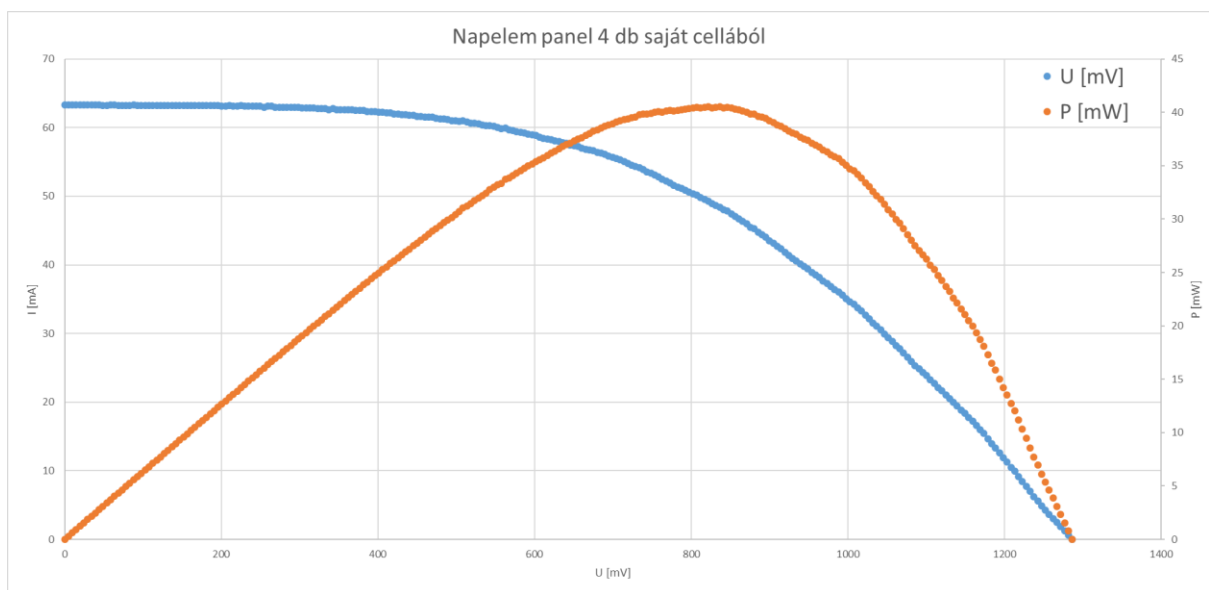
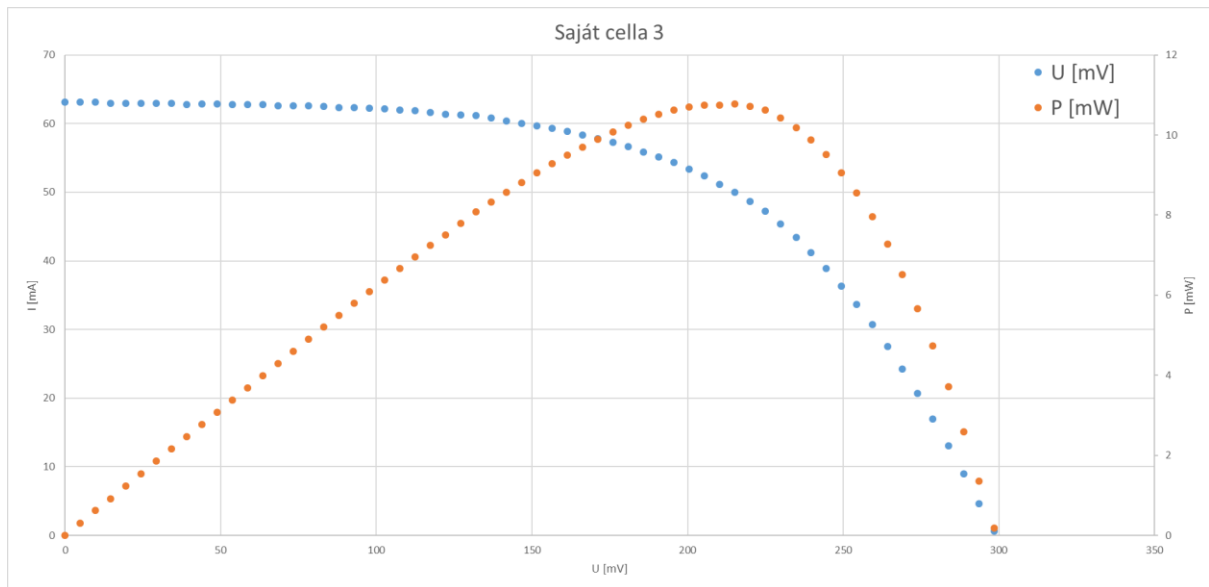


Az első két grafikon viszonylag szépen visszaadta, amit vártunk, egy tipikus napelem jelleggörbét. Az első két mérést több cellát tartalmazó modulokon végeztük, így nagyobb feszültséget kaptunk. Az utolsónál csak egy cellát mértünk, ennek a megfelelő méréséhez  $1\ \Omega$  -nál jóval kisebb ellenállást kellett volna rákapcsolni. Ezen



már a mérés is nehézkes, ilyen esetben célszerű négyvezetékes mérési elrendezést alkalmazni. Egy-egy cella mérésére sokkal alkalmasabb egy automata mérőberendezés, a saját celláinkat is ezzel mértük (tanszéki fejlesztés). A mérési eredmények az alábbi grafikonokon láthatóak:



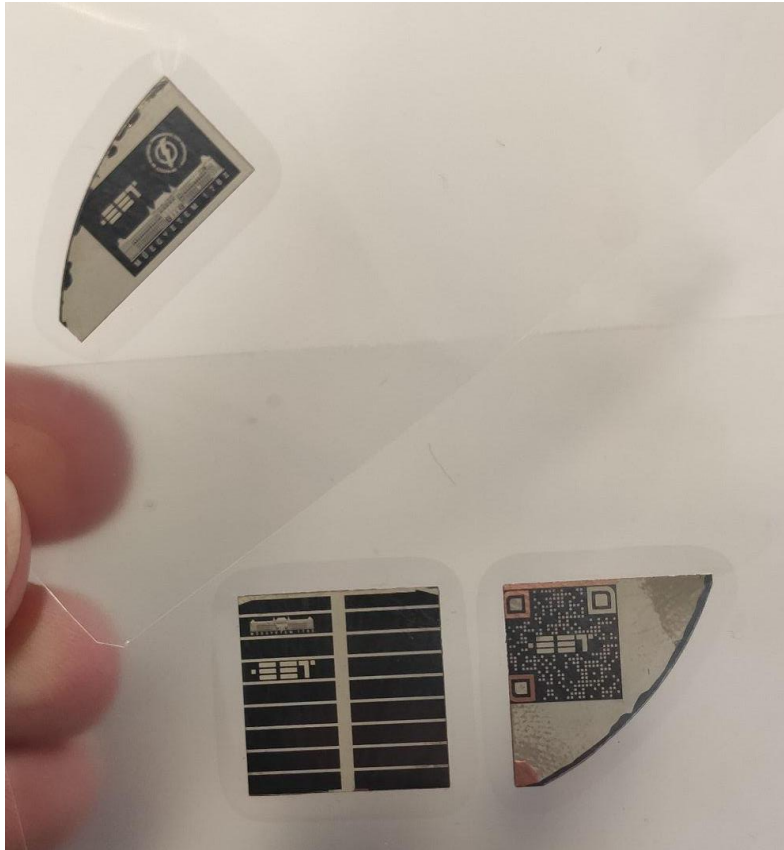


Az alábbi táblázatban összefoglaltuk a mérések számszerű eredményeit:

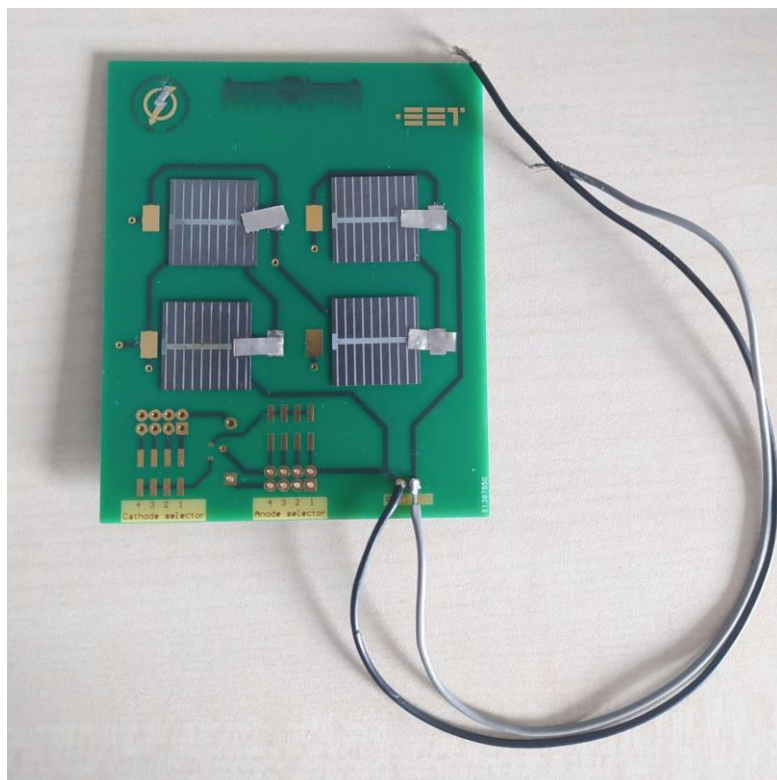
Mennyiség		Cella 1	Cella 2	Cella 3	Modul
$U_0$	mV	296,1	213,0	299,2	1287
$I_{rz}$	mA	58,34	62,01	63,11	63,35
$P_{max}$	mW	7,707	4,383	10,767	40,51
$U_{opt}$	mV	185,9	107,6	215,2	836,5
$I_{opt}$	mA	41,46	40,726	50,021	48,43
$R_{opt}$	$\Omega$	4,484	2,643	4,303	17,27
<b>FF</b>	%	44,62	33,19	57,03	49,71
$R_s$	$\Omega$	2,105	2,857	1,143	8
$R_{sh}$	$\Omega$	66,67	13,33	106,67	693,3
$P_{fény}$	W/m <sup>2</sup>	800		850	800
<b>Felület</b>	cm <sup>2</sup>	2,9		2,9	11,60
<b>Hatásfok</b>	%	3,322		4,368	4,366

Itt látható, hogy a cellák hatásfoka viszonylag alacsony (néhány százalék), a labor során alkalmazott technológiával viszont 12% körüli hatásfok is elérhető. Ez feltehetően azért van, mert a diffúzió során valami nem a tervezettek szerint sikerült, így a PN átmenet nem lett az elvárt minőségű.

Ez után 4 darab cellát hot plat-en történő újraömllesztéses forrasztással beültettünk egy NYÁK panelre, sorosan kötöttük őket és így is kimértük a karakterisztikáját. A cellafeszültségek így összeadódnak, a rövidzárási áramot pedig a legkisebb áramú cella korlátozza.



*Szeletből kivágott napelemcellák, amelyeket elvihettünk emlékbe*



*Négy cella sorba kötve egy panelen*