



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Rózsás Gábor

**FÉLVEZETŐ ESZKÖZÖK HŰTÉSE  
HÁTOLDALON KIALAKÍTOTT  
MIKROMÉRETŰ  
CSATORNÁKKAL**

KONZULENS

Dr. Plesz Balázs,  
Dr. Bognár György,  
Takács Gábor

BUDAPEST, 2017

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Bevezetés .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Napelemek és hűtési igényei.....</b>	<b>8</b>
2.1 Napelemek működésének fizikája és fontosabb paraméterei .....	8
2.2 Napelemek hőmérsékletfüggése .....	9
2.3 Koncentrátoros napelemcellák.....	11
2.4 Napelem cellák hűtési megoldásai.....	13
2.5 Napelem hátoldali kontaktusrétegének kialakítási módjai .....	14
<b>3 Integrált eszközök mikrocsatornás hűtése .....</b>	<b>18</b>
3.1 Mikrohűtőbordák alkalmazása 3D tokozású eszközök esetén.....	18
3.2 Integrált mikrocsatornák kialakítási technológiái.....	19
<b>4 A hűtőeszközök gyártástechnológiájának kidolgozása .....</b>	<b>26</b>
4.1 Szilíciumba integrált mikrocsatornák kialakítási technológiájának tervezése.....	26
4.2 Napelemcella hátoldali kontaktusrétegén létrehozott réz mikrocsatornák kialakítási technológiája .....	33
4.3 Új befogó tervezése .....	35
4.4 A galvanizálási folyamat finomhangolása .....	36
<b>5 Kialakított struktúrák mérése és minősítése .....</b>	<b>43</b>
5.1 Szilíciumba integrált mikrocsatornák .....	43
5.2 Réz rétegben kialakított mikrocsatornák .....	48
<b>6 Jövőbeli tervek .....</b>	<b>49</b>
<b>7 Összefoglalás.....</b>	<b>50</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>51</b>

# Összefoglaló

A fokozatos méretcsökkenésnek és a Moore-törvényen is túlmutató integrációnak következtében a félvezető eszközök egységnyi felületre vett disszipációja fokozatosan növekszik. A 3D tokozású integrált áramkörök fejlődésével párhuzamosan a félvezető eszközök innovációja az energiaiparban is megjelent. A legmodernebb napelemek hatásfoka jelenleg eléri a 40-45% -ot, amit koncentrátoros rendszerekkel érnek el. A napfényt optikai eszközökkel tükrözik és koncentrálják a fotovoltaiikus cella felületére. Az így elérhető teljesítménysűrűség jelentős mennyiségű hő disszipálásával jár. A félvezető eszközben keletkező hő elszállítása, hasonlóan a 3D tokozású integrált áramkörökhöz, a napelemek esetében is fontos kérdés, hiszen a napelem megemelkedett hőmérséklete miatt az eszköz teljesítménye jelentősen csökken. Ezért a koncentrátoros fotovoltaiikus eszközök (CPV) esetén - főleg a nagyobb koncentrációs értékeknél -, az aktív hűtési módszerek alkalmazása szintén elkerülhetetlen. Kiemelt jelentőségű probléma ezért ezen eszközök hatékony hűtésének megoldása, illetve az ehhez szükséges integrált hűtőeszközök előállítási technológiájának kidolgozása. A nagymennyiségű termelődött hő, lehető legkisebb hőellenállással történő elvezetése új struktúrájú, mikrométerű és integrált hűtőeszközök alkalmazását igényli.

Az Elektronikus Eszközök Tanszékén egy olyan kutatási projektben vettem részt, amelynek célja, hogy integrált hűtési megoldásokat fejlesszünk ki félvezető eszközökhöz. A projekt részeként szilícium szeleteken egy technológiai soron belül kell létrehoznunk hődisszipáló félvezető eszközöket, valamint az ellentétes oldalra mikrométerű hűtőcsatornákat, az alkalmazástól függően különböző technológiai eljárásokkal. Ezzel lehetővé válik a mikrométerű hűtőbordák hőátadási folyamatainak és hűtési teljesítményének vizsgálata és karakterizálása.

A feladatom két eltérő struktúra kidolgozása és vizsgálata, ugyanakkor a kialakított eszközök funkciójukat tekintve szorosan összekapcsolódnak. A egyik esetben magában a szilíciumban alakítom ki a mikrocsatornákat CMOS kompatibilis izotróp marás segítségével. Legnagyobb előnye, hogy az eszköz hordozója maga a szilícium. Ennek köszönhető a kis termikus ellenállás az áramkör és a hűtőfelület között. A napelemek hűtését tekintve az általam tervezett struktúrának a legnagyobb előnye, hogy a mikrocsatornákat közvetlenül a napelem cella hátsó fémezési rétegén a szilícium szelet

felületén valósítom meg, így a napelem kontaktusrétege és az annak hűtésére szolgáló eszköz egy technológiai folyamat során alakítható ki. Az így elkészített struktúra egyszerre tartalmazza a PV eszközt és a mikrocsatornás hűtőeszközt. Ezzel a technológiával, egyrészt kiiktatva egy esetleges termikus interfészt, a két egység között minimalizálható a hűtőeszköz termikus ellenállása, másrészt gyakorlatilag bármilyen napelemtípusra alkalmazható.

Dolgozatomban ismertetem ezen aktív eszközök és a hűtésükre szolgáló mikrocsatornák kialakítási technológiáját. Kitérek a technológia adta előnyökre, a gyártás során felmerülő esetleges nehézségekre és azok megoldási lehetőségeire. Továbbá ismertetem a legyártott mintákon végzett karakterizáló mérések eredményeit.

## Abstract

Due to the progressive decrease of the size of devices and the more than Moore integration, the dissipation of per unit area upon a surface of semiconductor devices significantly increases. In parallel with the development of 3D capsulated integrated circuits, the innovation of semiconductor devices has also appeared in the energy industry. The efficiency of the most modern solar cells currently reaches 40-45%, which is achieved by concentrator systems. Sunlight is reflected by optical devices and concentrated onto the surface of the photovoltaic cell. The resulting power density leads to a significant amount of heat dissipation. Carrying out the heat, generated by the semiconductor device, just like in case of the 3D integrated circuits, is also an important issue for solar panels, as the efficiency of the device is greatly reduced due to the increased solar cell temperature. Therefore, in the case of concentrator photovoltaic devices (CPVs), especially at higher concentrations, the use of active cooling methods is also inevitable. A key issue therefore is the solution of efficient cooling of these devices and the development of the production technology for the integrated coolers required for this purpose. The conduction of large quantity of produced heat, with minimal thermal resistance, requires the use of new structured, microscaled and integrated cooling devices.

At the Department of Electron Devices I participated in a research project aimed developing integrated cooling solutions for semiconductor devices. As part of the project, we have to create heat dissipating semiconductor devices on the silicon wafer within a technological stepline, and then microscaled heatsinks on the opposite side with various technological processes, depending on the application. This way it becomes possible to examine and characterize heat transfer processes and cooling performance of microscaled heat sinks.

My task is to elaborate and examine two different structures, but the created devices are closely related in terms of their function. In one case, I create microchannels in silicon using CMOS compatible isotropic etching. The biggest advantage is that the carrier of the device is the silicon itself. This results in low thermal resistance between the circuit and the cooling surface. As regards the cooling of solar cells, the major advantage of the structure I have designed, is that the microchannels are realized directly on the surface of the silicon wafer on the rear metallization layer of the solar cell. So that

the contact layer of the solar cell and the device for cooling can be formed in one technological process. The structure which is produced in this way includes the PV device and the microchannel cooler together. With this technology, eliminating any possible thermal interface between the two units, the thermal resistance of the cooling device can be minimized and, on the other hand, it can be practically applied to any solar cell type.

In my paper, I present the technology of production of these active devices and microchannels for cooling them. I mention the benefits of technology, the potential difficulties encountered in manufacturing and their solutions. In addition, I present the results of the characterization measurements made on the produced samples.

# 1 Bevezetés

Az elmúlt évtizedig az elektronika fejlődése a Moore jóslatban előre jelzett tendenciákat követte. Azonban a more-than-Moore (több mint Moore) integráció hatására a mai nagy számítási teljesítményű és három dimenziósan integrált (egymásra helyezett félvezető lapkák, System-in-Package integráció, stb.) elektronikus eszközök kezdik elérni működésük disszipációs korlátait. Hasonlóan igaz ez a félvezető ipar minden területére úgy, mint például a napelemgyártásra is. A mai legnagyobb hatásfokú napelemeket a napfény optikai koncentrállásával érik el. Azonban ennek a nagyfokú koncentrállónak a hatására a nem elektromos generációra fordított sugárzási teljesítmény hőmérsékleti veszteség formájában jelenik meg. A nagy disszipációsűrűség által keletkezett hő mindkét esetben rontja az eszközeink hatásfokát, szélsőséges esetben integrált áramkörti struktúráknál akár funkcionális zavarokat is okozhat. Ez támasztja alá a szükségességét egy hatékony hűtési módszer kidolgozásának, hogy a hőmérséklet okozta negatív teljesítménycsökkenést és az esetleges degradációkat kiküszöböljük, a félvezető eszközeinket egy adott hőmérsékleti tartományban tudjuk üzemeltetni.

Feladatom fő célja, az új hűtési megoldások kialakításához szükséges technológia kidolgozása. Dolgozatomban bemutatott eszközök azon megfontoláson alapulnak, hogy a hőmérséklet hatékony elvezetéséhez minimalizálni kell a hőellenállását a disszipáció helye és a környezet között ( $R_{th\_ja}$ ). Ennek egyik lehetséges megvalósítása a félvezető eszközt tartalmazó hordozóban, vagy annak a felületén kialakított mikroméretű csatornák hálózata. Ezekben a csatornáknak gázt vagy folyadékot keringtetve válik lehetségessé a disszipált hő elszállítása. Ráadásul a disszipáció helye és a csatornák fala közötti hőút hosszának csökkentésével is jelentősen csökken a hőellenállás, valamint a dolgozatban bemutatott eszközökben a termikus interfész anyagok (TIM) használata is kiküszöbölhetővé válik. [1]

Az Elektronikus Eszközök Tanszékén jelenleg ilyen mikroméretű hűtőcsatornákat tartalmazó struktúrák kutatása és fejlesztése zajlik, TDK munkámat ennek a kutatásnak a keretében végeztem.

## 2 Napelemek és hűtési igényei

Ebben a fejezetben ismertetem a szakirodalmi forrásokra támaszkodva a koncentrált napelemek alapvető fizikai tulajdonságait és kialakítási módjait. Ismeretem ezen eszközök hűtésére szolgáló megoldási lehetőségeit és az ezek kialakítására szolgáló technológiai eljárásokat.

### 2.1 Napelemek működésének fizikája és fontosabb paraméterei

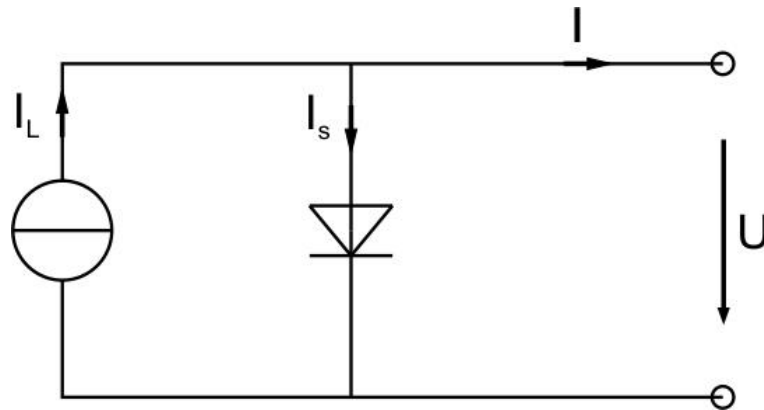
A napelem egy fotovoltaiikus eszköz, mely a fényt közvetlenül elektromos energiává alakítja át. A napelemekben alkalmazott fizikai hatás a foton-szilárdtest kölcsönhatás, azaz megvilágítás hatására töltéshordozók generálódnak a félvezető anyagon belül. Ennek az a feltétele, hogy a beeső foton energiája nagyobb legyen, mint az anyagra jellemző tiltott sáv szélessége. A folyamat eredménye egy mozgóképes elektron a vezetési sávban és egy lyuk (elektronhiány) a vegyérték sávban. A létrejövő töltéshordozókat valamilyen módon szét kell választani, hogy elkerüljük a rekombinációt. A szétválasztás egy a felület közelében kialakított p-n átmenet beépített terével valósul meg, így az (elsősorban a kiürített rétegben generálódott) elektronok az n-réteg felé, míg a lyukak a p-réteg felé áramlanak. A cella mindkét oldalához kivezetéseket csatlakoztatva a szétválasztott elektronok és lyukak összegyűjthetők, így az eszköz elektromos generátorként működik. [2]

A napelem alkalmazásához, de legfőképp a fejlesztéséhez ismerni kell a cella főbb paramétereit és a karakterisztikáit. Ezek ismeretében következtetni lehet az esetleges technológiai problémákra. A napelem cella legfontosabb elektromos paraméterei:

- üresjárás feszültség ( $U_{\text{ü}}$ ), rövidzárási áram ( $I_{\text{rz}}$ )
- maximális teljesítmény ( $P_{\text{max}}$ )
- a maximális teljesítményhez tartozó munkaponti feszültség ( $U_{\text{m}}$ ), munkaponti áram ( $I_{\text{m}}$ )
- optimális terhelő ellenállás ( $R_{\text{opt}}$ )
- fill-faktor vagy kitöltési tényező (FF)
- hatásfok ( $\eta$ )
- soros ellenállás ( $R_{\text{s}}$ )
- párhuzamos vagy sönt ellenállás ( $R_{\text{sh}}$ )



A megvilágított napelem cella legegyszerűbb helyettesítő képe egy párhuzamosan kapcsolt áramgenerátorból és egy diódából áll.



2.1. ábra: A napelem helyettesítőképe

Az ideális napelem karakterisztikája a következő képlettel írható le:

$$I = I_L - I_s \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (2-1)$$

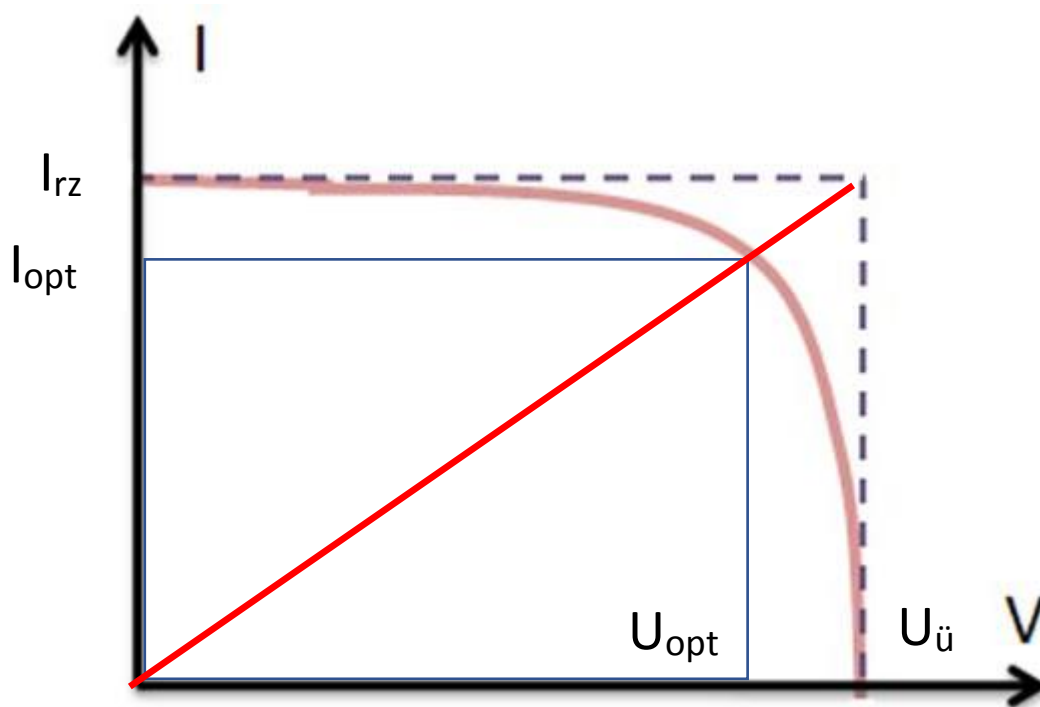
ahol:  $I_L$  - a generált fotoáram,  $I_s$  - a szaturációs vagy telítési áram,  $U_T$  - a termikus feszültség.

## 2.2 Napelemek hőmérsékletfüggése

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

A félvezető eszközök számos paramétere hőmérsékletfüggő. A napsugárzás erősségének növekedésével nem csak a napelem által hasznosítható spektrumtartomány intenzitása növekszik, hanem az infravörös tartomány is, ami elsődleges oka az eszköz felmelegedésének.

A hőmérséklet növekedésének hatására a diffúziós hossz növekedik, mert nő a diffúziós állandó és a töltéshordozók élettartama is. Ez némi növekedést eredményez a rövidzárási áram értékében. A p-n átmenet  $I_s$  telítési árama azonban annyira megnövekszik a termikusan generált kisebbségi töltéshordozók nagyobb koncentrációja miatt, hogy az elérhető kimeneti feszültségek ( $U_0$ ,  $U_m$ ) csökkenése lerontja a levehető teljesítményt és a hatásfokot. A karakterisztikák oldaláról nézve a jelenséget a hőmérséklet növekedése a karakterisztika lekerekedését eredményezi. Ez rontja a kitöltési tényezőt, melyről a későbbiekben lesz szó. [3]



2.2. ábra: az ideális és valós napelem karakterisztika [4]

A hőmérséklet növelésével tehát a rövidzárási áram kissé nő, míg az üresjárási feszültség jelentősen csökken. Jó közelítéssel a rövidzárási áram változásától eltekinthetünk. A napelem karakterisztikát az üresjárási feszültségre felírva,

$$U_0 = U_T \ln \left( \frac{I_L}{I_S} + 1 \right) \quad (2-2)$$

látható, hogy az üresjárási feszültség egyrészt lineárisan nő a hőmérséklettel, másrészt pedig exponenciálisan csökken  $I_S$ -en keresztül. Tehát a csökkenő hatás a domináns, ami közelítőleg  $-2 \frac{mV}{^\circ C}$ . [5]

A napelemek hatásfoka definíció szerint a maximálisan leadható teljesítmény és a beérkező fénytelsítmény hányadosa,

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{be}} \quad (2-3)$$

így a teljesítmény és a hatásfok mennyiség csak egy – a besugárzott fénytelsítmény ( $P_{be}$ ) reciprokának megfelelő – szorzótényezőben tér el egymástól, így a két mennyiség hőmérsékletfüggése jellegetre azonos.

A napelemek egy további, gyakran használt és a hatásfokkal szorosan összefüggő jellemzője a maximális teljesítménynek a rövidzárási áram és az üresjárási feszültség

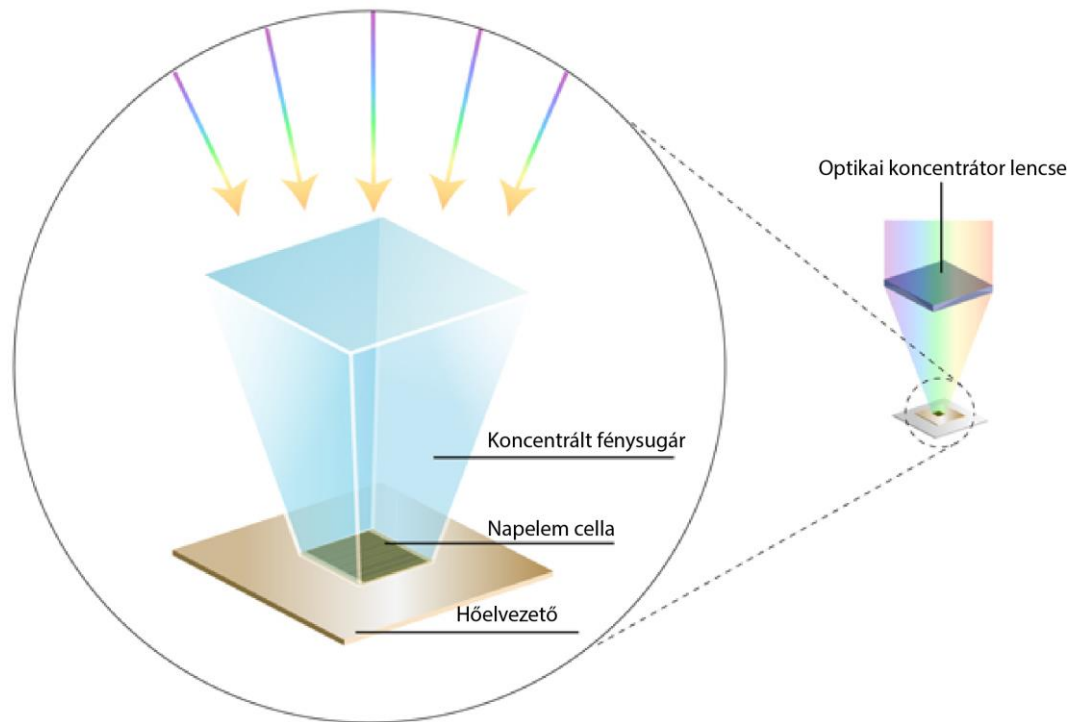
szorzatával képzett hányadosa, a kitöltési tényező (gyakran használatos a fill faktor angol elnevezés is, amelynek rövidítéseként a kitöltési tényezőt FF-fel jelöljük):

$$FF = \frac{U_{opt}I_{opt}}{U_{\ddot{u}}I_{rz}} \quad (2-4)$$

A fenti képletből az üresjárási feszültség jól látszik a kitöltési tényező és a maximális teljesítmény közötti szoros összefüggés: A nagyobb kitöltési tényező magasabb maximális teljesítményt és hatásfokot jelent. Minél magasabb a kitöltési tényező, annál jobban közelít a maximális teljesítmény az  $U_{oc} \cdot I_{sc}$  szorzathoz, azaz a karakterisztika annál jobban közelíti meg egy  $I_{sc}$  áramú és  $U_{oc}$  maximális feszültségű ideális áramforrás jelleggörbéjét, tehát a maximálisan leadható teljesítmény is növekszik. Mivel a napelem karakterisztikáját számos paraméter (pl. telítési áram, idealitási tényező, soros és párhuzamos parazita ellenállás) befolyásolja, tekinthetjük úgy, hogy a kitöltési tényező ezen paraméterek az ideális napelem karakterisztikára gyakorolt összesített hatását tartalmazza, azaz a kitöltési tényező gyakorlatilag a napelem paramétereinek nem-idealitásából eredő összes veszteséget összegzi. [6]

## 2.3 Koncentrátoros napelemcellák

A koncentrátoros napelemek esetén a beeső fénysugarakat optikailag koncentrálnak, egy nagyobb felületről összegyűjtött fénysugarakat egy jóval kisebb felületű napelem cellára irányítják, tükrözik. Ez alapján meghatározható a koncentráció foka, ami a koncentrátor és a cella felületének hányadosaként számítható.



**2.3. ábra: A koncentrátoros fotovoltaiikus cella [7]**

A koncentrátoros napelem rendszerek a nagy hatásfok eléréséhez legtöbbször többátmenetes (ún. hetero-junction) félvezető cellákat alkalmaznak, valamint Fresnel lencsákat, vagy parabolatükröket, hogy a napfényt egy kis felületre fókuszálják, így a nagyobb energiasűrűség egyben nagyobb hatásfokú energiaátalakítást tesz lehetővé. Az ilyen nagymértékben fókuszált CPV eszközökkel csökkenteni tudják az elektromos átalakítás költségeit, azáltal, hogy a nagyfelületű drága alapanyag helyett, kisebb felületű nagyon jó hatásfokú cellákat alkalmaznak, valamint nagyfelületű olcsó koncentrátor anyagokat. Ezzel ugyanakkora felületre eső sugárzást gyűjtenek össze (koncentrálják) egy lényegesen kisebb felületű napelemcellára, amint a 2.3. ábra is mutatja. Ugyanakkor a beeső sugárzás csupán csak egy töredéke fordítódik ténylegesen elektromos energia átalakítására. Egy átlagos koncentrátor nélküli napelem cella 24%-os hatásfokkal működik. [8] A maradék elnyelt energia termikus energiává alakul a cellán belül. A koncentráció hatására nagyobb besugárzott teljesítmény következtében a koncentrátoros napelemekre fokozottan igaz, hogy ha nem kezeljük megfelelően ezt a megnövekedett hőenergiát akkor az a napelem cellánk hatásfokának romlásához fog vezetni, ami további melegedést eredményez a cellánkban. [9,10]

## 2.4 Napelem cellák hűtési megoldásai

A bejövő fény koncentrációja a napelem felületére, a fotovoltaikus eszközök teljesítménynövelésének egy igen hatásos módja. Az utóbbi években koncentrátorokkal elérték a napelemek hatásfokának maximumát. CPV [11]. Ugyanakkor a koncentrátoros napelemeknek - a jobb hatásfokuk ellenére is - van egy súlyos hátulütőjük, mégpedig a nagymennyiségű hővesztés, amit a nagy teljesítménysűrűség és a fotovoltaikus átalakítási folyamatok során fellépő veszteségek okoznak. Még a legkorszerűbb többátmenetes cellák használatával is - melyek hatásfoka 40-45 % között van - a hőteljesítmény az ezerszeres koncentrációnál  $50 \text{ W/cm}^2$  és a százszorosan koncentrált napfényél is  $5 \text{ W/cm}^2$  felett van. Ennél fogva az ilyen hatásfokú CPV eszközök hűtése elkerülhetetlen.

A CPV eszközök hűtési lehetőségeit jól összefoglalja a [8]. A tanulmány kihangsúlyozza, hogy a 150-es koncentráció szint felett az aktív hűtési megoldások alkalmazása elkerülhetetlen, és a számos megoldásra alkalmas lehetőség között, a mikroméretű hűtőcsatornákat tartalmazó rendszerek is alkalmasak lehetnek a feladatra.

A CPV eszközök mikroméretű csatornákkal történő hűtését számos forrás megemlíti és általában a hűtőszervezet elhelyezkedése szerint két fő csoportra osztható.

Az első megoldás a hűtőcsatornák közvetlenül a PV eszköz félvezető alapanyagába integrálása [9], a második lehetőség pedig a mikrohűtőeszköz csatlakoztatása, hozzáillesztése a PV cella hátsó felületéhez [12,13].

Habár az első megoldás nyújtja a legkisebb hőellenállást, azonban számos hátulütője van. A mikrocsatornák integrálása az alapanyagba amellyel, hogy költséges mikrotechnológiai megmunkálást igényel, többnyire csak szilícium alapanyagú napelemeknél használható, emellett csökkenti a fény elnyelésére alkalmas térfogatot és gyengíti a mechanikai stabilitást is.

A második megoldásnál ugyan nem állnak fenn a félvezető alapanyagra vonatkozó korlátozások és stabilitást befolyásoló tényezők, azonban a hűtőeszköz és a PV eszköz között szükséges termikus interfész nagyban megnöveli a hűtőrendszer termikus ellenállását. [14]

Mindkét megoldás esetén a napelemek hűtésére szolgáló mikroméretű csatornákat a napelem hátoldali felületében vagy felszínén alakítják ki.

## 2.5 Napelem hátoldali kontaktusrétegének kialakítási módjai

### 2.5.1 Napelemek fémezési eljárásai

A kristályos szilícium alapú napelem gyártásban a legjobb hatásfok elérése érdekében elengedhetetlen a megfelelő elektromos kontaktus biztosítása az alapanyag és a cellák közti külső összeköttetések között. Ennek érdekében a gyártástechnológia utolsó lépéseként a napelem cellák felületeit minden esetben valamilyen fémréteggel látják el. Ez a megvilágított oldal esetén egy fésűszerű vékony vezetékezés a minél kisebb kitarakás érdekében. A hátoldali fémezés többnyire az egész szelet felületén történik.

A jó kontaktusréteg legfontosabb jellemzői [15]:

- Jól tapadjon a szilícium felületén.
- Az alkalmazott fémek fajlagos ellenállása alacsony legyen.
- A rekombinációs veszteség minimális legyen fém-félvezető határfelületén.
- A réteg idővel ne degradálódjon.
- A felület forrasztható legyen.
- Lehetőleg olcsó legyen.

Az iparban alapvetően kétféle fémezési eljárást alkalmaznak. A két eljárás előnyeit és hátrányait az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: A napelemgyártásban használt két fémezési eljárás összefoglaló összehasonlítása [16]

Kontaktus	Előnyök	Hátrányok/Kihívások
<b>Ezüst kontaktus réteg</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Egyszerű gyártási folyamat</li><li>• Nagy kihozatal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Drága technológia</li><li>• Kis mélységbeli különbségek</li><li>• Nagy kontaktus ellenállás</li><li>• Alacsonyabb cella hatásfok</li></ul>
<b>Ni/Cu kontaktus réteg</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alacsonyabb ár</li><li>• Alacsonyabb árnyékolási veszteségek</li><li>• Nagy mélységbeli különbségek is elérhetőek</li><li>• Kis kontaktus ellenállás</li><li>• Nagyobb hatásfok</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Komplex, bonyolult technológia</li><li>• Rézgalvanizálódás a nem kívánt helyekre</li><li>• Gyengébb tapadás a szilíciumhoz</li></ul>

A manapság legelterjedtebben szitanyomtatás eljárással alakítják ki a vezetékeezést, viszik fel a kontaktus réteget. A technológiában egy ezüst port tartalmazó szerves pasztát használnak, amit egy finom szövésű szitán kennek keresztül, melyen a kialakítandó mintázatoknak megfelelően bizonyos helyeken szabad a szitaszövet, a védendő helyeken pedig egy kikeményített emulzióval van fedve. A mintázatnak megfelelően felvitt ezüst pasztát ezután 800-900 °C -on hőkezelik, így kialakul egy viszonylag nagy kontaktusellenállású átmenet a paszta és a szilícium között.

A kontaktusréteg kialakításának másik típusa, ahol különböző fémek vékonyréteg leválasztási eljárásokkal (kémiai gőzfázisú leválasztás - CVD, vákuum gőzölés) meghatározott vastagságú rétegszerkezeteket hoznak létre a napelemek felületén és ezekből az úgynevezett kiindulórétegekből galvanizálással alakítják ki a megfelelő vastagságú kontaktus réteget. A mintakialakításhoz általában lézerabblációs eljárásokat használnak. A kiindulóréteget egy két egymáson elhelyezkedő fémréteg alkotja. Ezek közül a leggyakrabban használt rétegszerkezet a nikkel/réz szerkezet, de egyes források említést tesznek titánium/réz rétegszerkezetéről is [17]. A nikkel és a titánium szerepe a struktúrában az úgy nevezett barrier réteg, mely megakadályozza a rézatomok diffúzióját a szilíciumba. A barrier réteget a jobb tapadás és kontaktus elérése érdekében szinterelik 300-700 °C között, melynek következtében kialakul egy vékony nikkelszilicid, vagy titánszilicid réteg a fém félvezető határán. -Egyes források szerint figyelni kell a hőkezelés során, ugyanis a titánium  $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  es koncentráció felett nagymértékű teljesítménycsökkenést okoz, a kisebbségi töltéshordozók élettartamának csökkentésével. [18] -. Erre kerül leválasztásra egy vékony réz réteg, mely a galvanizálási eljárás induló rétege. Az iparban egyelőre még kevésbé elterjedt technológiai eljárás, ugyanakkor az alkalmazott fémzési eljárások között a rétegzett nikkel/réz (Ni/Cu), vagy titánium/réz (Ti/Cu) alkotta kontaktus kialakítása, a jövőbeli fémzési technológiák közül az egyik legígéretesebb opció.

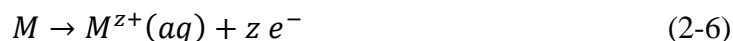
### **2.5.2 Rézréteg kialakítása elektrokémiai galvanizálással [16, 19]**

A galvanizálás, egy fémet vagy valamilyen vezető felülettel rendelkező anyagot, külső áramforrás segítségével fémmel bevonó elektrokémiai eljárás. Galvanizáláskor, a bevonandó munkadarab a katód, amit a bevonatnak megfelelő fémsó vizes oldatába merítve az egyenáramforrás negatív pólusához kapcsolunk. Az



elektrodfolyamat eredményének megfelelően az átáramló töltésmennyiség által megszabott mennyiségű fémbevonat képződik.

Az anód általában egy fém rúd, ami megegyezik a bevonó fém anyagával. Ezt kapcsoljuk az egyenáramforrás pozitív elektródjára. Az utóbbi esetben az



elektrodfolyamat érvényesül, azaz a bevonó fém oldódása az anódfolyamat. Az M mindkét esetben a bevonó fémet jelöli, M(aq) a fémsó vizes oldatára utal, z pedig az oxidációs szám.

A galvánbevonatnak különböző igényeket kell kielégítenie:

- legyen tömör, pórusmentes,
- jól tapadjon az alapfémhez,
- kielégítő mechanikai tulajdonságokkal rendelkezék.

A bevonat minőségének befolyásolása a fémleválás mechanizmusának ismeretében válik lehetségessé. Galvanizáláskor az oldatban lévő kationok a katódhoz vándorolnak, ott elektront vesznek fel, elvesztik a töltésüket és elektromosan semleges fém atommá alakulnak. A leválasztódó fém mennyiségét Faraday elektrolízis törvényei határozzák meg:

**Faraday első elektrolízis-törvénye:** Az elektrolízis során az elektródokon képződő anyag tömege (m) arányos az áthaladó elektromos töltésmennyiséggel (Q).

**Faraday második elektrolízis-törvénye:** Adott elektromos töltésmennyiséggel elektrolizált anyag mennyisége arányos az anyag kémiai egyenértéksúlyával

Faraday törvényei matematikailag kifejezve a következő képlettel írhatók le:

$$m = \frac{Q}{F} \frac{M}{z} = \frac{I \cdot t}{F} \frac{M}{z} \quad (2-7)$$

, ahol a Q az átáramlott töltésmennyiség, I az áram, t az eltelt idő, z az oxidációs szám változása, az m és az M az elektrolízis során képződő anyag tömege és moláris tömege, F pedig a Faraday konstans (96 485 C/mol, egy mol elektron töltése).

Az optimális arányú növekedési sebességet és az egyenletes homogén rézfelületet a jól paraméterezett és pontosan meghatározott galvanizálási technológia biztosítja.



Leginkább az áramsűrűség optimalizálásával és különböző adalékanyagok használatával lehet a kívánt sebességarányt biztosítani, de a hőmérséklet és a galvánfürdő keverése is befolyásolhatja azt. Az legegyszerűsebb galvanizált felület eléréséhez kísérleti értékek alapján a 20 mA/cm<sup>2</sup> -es áramsűrűség a legoptimálisabb. [20]

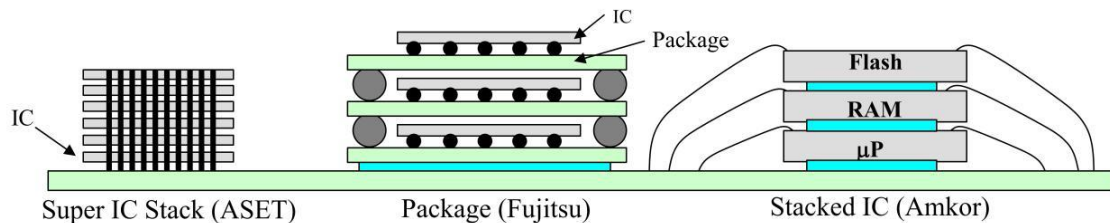
Réz galvanizálása során a galvanizáló folyadék rézszulfát vizes oldatának (CuSO<sub>4</sub>[H<sub>2</sub>O]<sub>5</sub>) és kénsavnak a keveréke (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Ez az oldat tartalmazza a galvanizációhoz szükséges pozitív töltésű rézionokat. Az alkalmazott egyenáram hatására ezek a pozitív töltések a negatív potenciálú céltárgy (a katód) felé indulnak meg. A reakció 5-1 egyenlet szerint a réz kiválást a rézionok redukciója okozza a katódon.



### 3 Integrált eszközök mikrocsatornás hűtése

Integrált áramkörökben az egységnyi felületre integrált tranzisztorok száma és az áramkörök működési sebessége is rohamosan növekszik. A Moore jóslatnak megfelelően másfél-, két évente megduplázódik az egységnyi felületre integrálható tranzisztorok száma. Gordon Moore jóslata 1965-től mind a mai napig helytállónak bizonyult. Azonban a More-than-Moore integráció (3D tokozás, System-in-Package, System-on-Package rendszerek stb.) esetén az egységnyi felületre vett disszipáció akár többszöröse is lehet az egy chipen lévő hőtermelésnek.

Az integráltság növekedése tehát nem csak a félvezetők felületén valósulhat meg, hanem térben is az ún. 3D integrációnak köszönhetően. A harmadik térdimenzió kihasználása többféleképpen lehetséges, ahogy azt például a 3.1. ábra mutatja. Könnyen belátható, hogy az ilyen tokok esetén az egységnyi felületre jutó disszipáció jelentősen megnövekedhet.



3.1. ábra: 3D tokozás különböző megvalósításai [21]

#### 3.1 Mikrohűtőbordák alkalmazása 3D tokozású eszközök esetén.

Már a hagyományos integrált áramkörök esetén is nagy problémát okoz a disszipációból származó hő legkisebb termikus ellenállású úton való elvezetése. A 3D tokozás és a miniatürizálás hatására az eszközök egységnyi felületre vett disszipációja rohamosan növekszik (akár  $100 \text{ W/cm}^2$  fölé). További problémát jelent, hogy a túlmelegedés mellett a hőmérsékletváltozásra érzékeny áramkörök egyes paraméterei jelentősen megváltozhatnak, ami akár működésképtelenséghez is vezethet. Az előzőekben bemutatott okok is alátámasztják, hogy 3D integráció esetén különös figyelmet kell fordítani a termikus menedzsmenthez kapcsolódó kérdésekre, így tovább növelve a modern eszközök teljesítményét és megbízhatóságát. [21]

A jelenleg alkalmazott makroméretű hűtőeszközök mellett, hogy jelentős tömeget és térfogatot képviselnek, kezdik elérni a hűtőteljesítményük maximumát. Egy modern, nagy hűtőképességű processzorhűtő hőátadási tényezője alacsony, ezért új típusú hűtőeszközök kifejlesztése szükséges. Egy lehetséges megoldás a mikroméretű hűtőeszközök alkalmazása, aminek segítségével a hőút hosszának és így a hőellenállásnak a csökkentése, a termikus interfész anyagok számának csökkentése, valamint a hőátadási együttható jelentős növelése válik lehetővé. Ennek egyik megvalósítása az integrált áramkörök hordozójában kialakított mikroméretű csatornák hálózata. Az elgondolás alapja az, hogy a kb. 150-300 $\mu$ m vastag szilícium hordozónak csak a felső 1–2%-át használjuk az áramköri funkció megvalósítására, azaz a félvezető eszközök létrehozására. Az alsó kb. 98% kihasználatlan marad (eltekintve egyes MEMS eszközökkel egybeintegrált megoldásoktól), így akár alkalmas lehet arra, hogy kialakítsunk egy mikroméretű csatornákkal ellátott hűtőbordát a félvezető chip hátoldalán. A csatornákat különböző rajzolattal, geometriával és különböző technológiával (reaktív ionmarás - RIE, nedveskémi marás) lehet készíteni. Mivel a szilícium nagyon jó hővezető, a hordozó kis termikus ellenállást jelentene az áramkör és a hűtőfelület között. A megoldás fő előnye, hogy lényegesen nagyobb megengedhető lokális disszipáció-sűrűség érhető el. Az ilyen integrált hűtési rendszerek igazi jelentősége a 3D tokozású rendszerekben mutatkozik.

### **3.2 Integrált mikrocsatornák kialakítási technológiái**

Feladatához szükséges volt megismerkednem mind a szilícium chipbe integrált, mind a szilícium felületén létrehozható struktúrák kialakítására alkalmas technológiákkal. Ebben az alfejezetben először, azokat a gyártási technológiákat tárgyalom, melyekkel magába a szilícium szeletben hozhatók létre integrált mikrocsatornás hűtőeszközök.

A mikromegmunkálási technológiák között két fő irányzatot lehet megkülönböztetni: felületi és tömbi megmunkálás. A tömbi megmunkálás során az alaphordozó izotróp vagy anizotróp marásával alakítják ki a kívánt alakzatot. Izotróp marás esetén a marószer a megmunkálandó anyagot minden irányban, orientációtól függetlenül egyforma sebességgel marja. Az anizotróp marószer viszont a különböző orientációjú kristálysíkokat eltérő sebességgel marja.

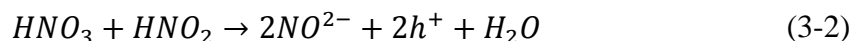
A szilícium tömbi megmunkálása alapvető fontosságú eljárás a MEMS technológiában. Árkot vagy üreget valamilyen maszkolórétegbe ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) nyitott ablak segítségével iztoróp vagy anizotróp marószerezrel egyaránt ki lehet alakítani.

### 3.2.1 A szilícium izotróp marása HNA marószerezrel [22, 23]

A leggyakrabban alkalmazott izotróp nedveskémiai marószerez a „HNA”, ami hidrogén fluorid (HF), salétromsav ( $\text{HNO}_3$ ) és ecetsav ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) keveréke.

Iztoróp marás esetén a marószerez izotróp jellege miatt a marás iránya nem függ a kristálytani orientációtól. A maszkoló rétegbe nyitott ablakon keresztül minden irányba egyenletes sebességgel mar és félgömb alakú mélyedések, vagy U alakú árkok keletkeznek lekerekített sarkokkal és éllel. A marás mechanizmusából következően lényegesen nagyobb az alámaródás mint az anizotróp marás esetén. Amilyen mély struktúra keletkezik vertikális dimenzióban, az alámaródás is ugyanakkora mértékű lesz mindkét irányban.

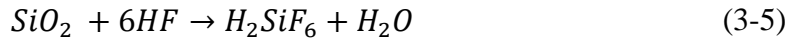
A marási mechanizmus egy szekvenciálisan ismétlődő oxidáció, amit egy oxid maródási folyamat követ. A marási folyamat a lyukak injektálásával kezdődik a Si kovalens kötéseibe a salétromsav által, ami egy oxidáló ágensként van jelen a reakcióban. A létrejött lyukak a folyamat során meggyengítik a kovalens kötést ezáltal oxidálják a szilíciumot a (3-1), (3-2), (3-3) egyenlet szerint:



A  $\text{Si}^{2+}$  és az  $\text{OH}^-$ -ből, ami a víz bomlásából származik,  $\text{Si}(\text{OH})_2$  keletkezik, amiből ezután rögtön felszabadul egy  $\text{H}_2$ , így létrejön a  $\text{SiO}_2$ , ahogy azt a (3-4) egyenlet is mutatja.



A hidrogén fluorid, HF feloldja a szilícium-dioxidot és egy vízben oldódó anyag,  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  keletkezik. A hidrogén fluorid és a szilícium-dioxid reakciója egyenlettel is kifejezve:



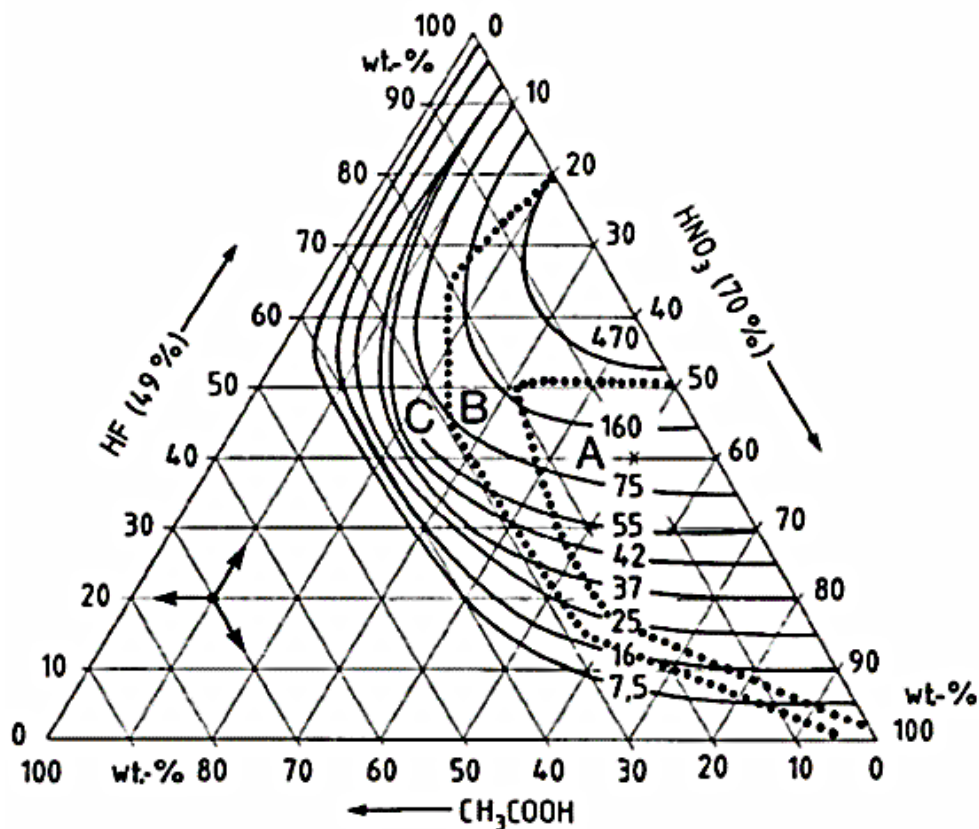
A szilícium teljes reakcióegyenletét a HNA marószerrel a 3-6 képlet írja le.



Az ecetsav a vegyületben oldószerként van jelen, valamint segít megelőzni a  $\text{HNO}_3$  disszociációját, mivel az ecetsav kevésbé poláros, mint a víz.

Mivel az izotrop marás alából a szilícium oxidációján, majd a keletkező  $\text{SiO}_2$  marásán alapul, így a szilícium-dioxid nem alkalmas a marási technológia maszkolására. A HNA marás elleni maszkolásra többnyire szilícium-nitridet ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), arany vékonyréteget, vagy fotoreziszt technológiát alkalmaznak.

Schwartz és Robbins munkájának köszönhető [24], hogy a HNA marási mechanizmusáról, a gyakorlati alkalmazások tekintetében az adott oldatösszetétel függvényében kialakuló geometriákról, valamint marási sebességről mélyebb belátást nyerhetünk. Az általuk bevezetett a 3.2. ábra szerinti HNA marási háromszög segítségével grafikus úton meghatározható és tervezhető az adott oldat térfogatszázalékos arányai alapján a marási sebesség és a marás során kialakuló felületi struktúra.

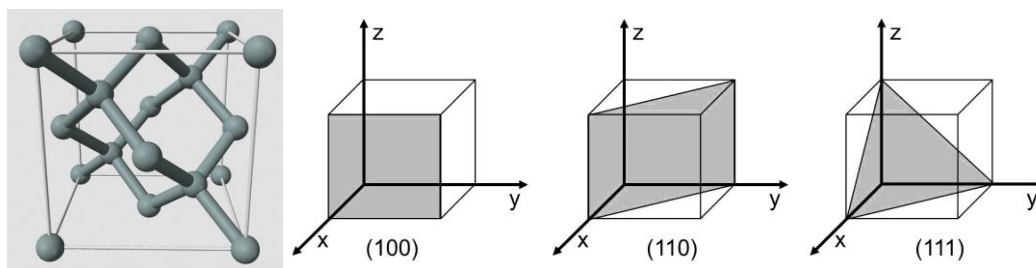


3.2. ábra: az izotróp marási háromszög [14]

A felületen kialakuló struktúrák alapján a háromszög területét 3 fő részre oszthatjuk, melyeket a pontozott vonal választ el egymástól. Azon összetételekhez tartozó területeken, ahol az oldat salétromsavban szegény és nagy tömegszázalékban tartalmaz hidrogén fluoridot a marási sebességet korlátozó folyamat az oxidációs lépés. Az ábrán ez a „C” tartománynak felel meg. Ilyen összetételek mellett porózus felületek és éles csúcsok alakulnak ki a marás során. Ha az oldatban a salétromsav található nagy tömegszázalékban és a hidrogén fluoridot csak korlátozott mennyiségben tartalmaz, abban az esetben a keletkező oxid oldódása a korlátozó mechanizmus. Az ilyen összetételű oldatok az „A” tartományon belül találhatóak, ahol a marás során sima, lekerekített felületek jönnek létre. A „B” tartomány az előzőekben tárgyalt két terület között helyezkedik el. Ilyen térfogati arányú oldatok használata lekerekített struktúrákat és matt felületet eredményez.

### 3.2.2 A szilícium anizotróp marása [2]

Az anizotróp marás marási profilját és sebességét a kristálysíkok atomsűrűsége és az adott síkra vonatkozó aktivációs energia határozza meg. Felületegységre vonatkoztatva a legnagyobb atomsűrűség az (111) síkban van és itt alakul ki a legkisebb marási sebesség.



3.3. ábra: A szilícium egységcella[forr] és a kitüntetett kristálysíkok

A szilícium anizotróp marása esetén a kitüntetett marási irány általában az [100] és az [110], ahol a marási sebesség jóval nagyobb az [111] irányhoz képest.

Egykristályos alapanyagnál a szelet orientációja lehet  $\langle 100 \rangle$ , vagy  $\langle 110 \rangle$ , ami lehetővé teszi a felület anizotróp marását. A mikro-elektro-mechanikai rendszereknél (MEMS) és mikrofluidikai alkalmazásokban is használatos anizotróp marás irányított módon megy végbe. Ebben az esetben egy maszkolóréteg segítségével adott helyeken árkokat vagy háromdimenziós struktúrákat alakítanak ki.

### 3.2.2.1 Anizotróp marószeres és maszkolórétegek

Az egykristályos szilícium szelet anizotróp megmunkálására számos marószer alkalmas. Ezek közül a teljesség igénye nélkül pár elterjedten alkalmazott nedveskémiai marószer:

- ammónium-hidroxid ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ),
- kálium-hidroxid ( $\text{KOH}$ ),
- nátrium-hidroxid ( $\text{NaOH}$ ),
- hidrazin ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ),
- etilén-diamin pirokatekol (EDP),
- tetrametil-ammónium-hidroxid (TMAH).

A szilíciumra vonatkozó marási sebesség jelentősen függ a marószer típusától, az oldat koncentrációjától és a marószer hőmérsékletétől. A marási sebesség növelése érdekében a marószeret a szobahőmérsékletnél magasabb, tipikusan  $60^\circ\text{C}$  és  $100^\circ\text{C}$  közötti hőmérséklet tartományban használják.

Irányított struktúra kialakításához szükség van egy maszkolórétegre, ami biztosítja a szilícium lokális megmunkálását. Anizotróp marás során leggyakrabban alkalmazott maszkolóréteg a szilícium-dioxid ( $\text{SiO}_2$ ) és a szilícium-nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). A maszkolóréteg kiválasztásánál figyelembe kell venni a réteg kialakítás módját, az adott marószerben a réteg maródási sebességét és a réteg megmunkálhatóságát is. A  $\text{SiO}_2$  réteg egyszerűen megmunkálható fotolitográfiai és nedves kémiai műveletekkel. Ezzel szemben a  $\text{Si}_3\text{N}_4$  réteg megmunkálásához gyakran fotolitográfia és  $\text{CF}_4/\text{O}_2$  plazma együttes alkalmazása szükséges, ami további gépigényt jelent a technológiai sorban.

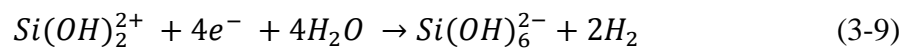
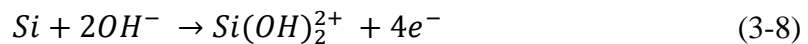
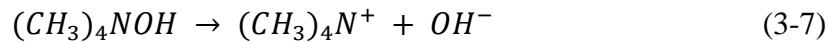
A TMAH a négytagú ammónium-hidroxidok csoportjába tartozik. Anizotróp marás szempontjából a legfontosabb tulajdonsága, hogy fémionmentes marószer, így nem igényel utólagos tisztítási eljárást, ami MOS kompatibilissé teszi. Nagyon jó a szelektivitása a szilícium-dioxid és szilícium-nitrid maszkolórétegekkel szemben, továbbá viszonylag nagy szilícium marási sebesség is elérhető. Mivel a TMAH nem disszociál  $130^\circ\text{C}$  alatt, így töményebb oldatok esetén lehetőség nyílik  $100^\circ\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékletű felhasználásra is.

### 3.2.2.2 A TMAH marási mechanizmusa

A TMAH, a mikrométerű csatornák kialakítására az egyik legalkalmasabb marószer a félvezető technológiában, a következő szempontok alapján:

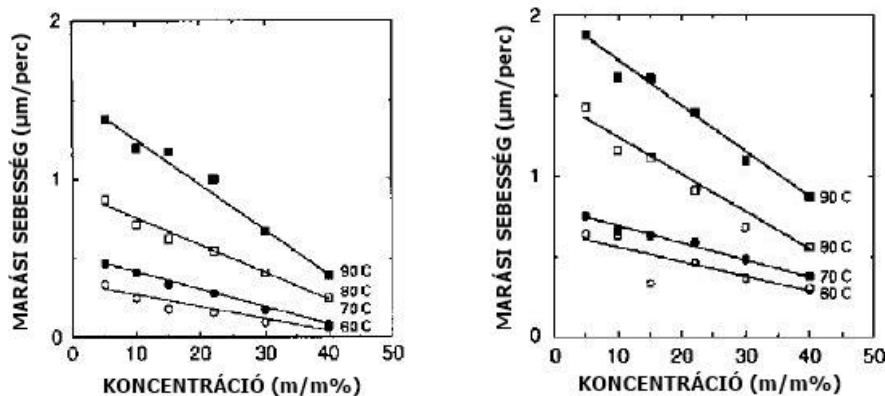
- fémionmentes,
- elérhető magas szilícium marási sebesség,
- jó szelektivitás a maszkolórétegekkel szemben,
- sima és egyenletes felületek alakulnak ki a tömbi megmunkálás során,
- alacsony toxicitás és könnyű kezelhetőség.

A szilícium és a TMAH kémiai reakciója az alábbi három fő lépésben írható le:



Az első lépésben a TMAH– $(CH_3)_4NOH$  hidrolizál és hidroxid ionok képződnek (3-7). A (3-8) egyenlet a felületen levő Si atomok és a hidroxid ionok reakcióját írja le, melynek végterméke az oxidált szilikát– $Si(OH)_2^{2+}$ , míg elektronok kerülnek a Si vezetési sávjába. Ezek az elektronok hasznosulnak a redukciós lépésben (3-9), melynek végtermékei közt szerepel a hidrogén.

A TMAH koncentráció függvényében változik a Si marási sebessége. Az oldat koncentrációjának csökkentésével nő a marási sebesség, a maximumát 5 m/m% körül éri el. A 3.4. ábra alapján látható, hogy a marási sebesség az [110] -ás irányban gyorsabb az [100] -ás irányhoz képest.



3.4. ábra: Marási sebességek [100], illetve [110] irányban a TMAH koncentráció függvényében [25]

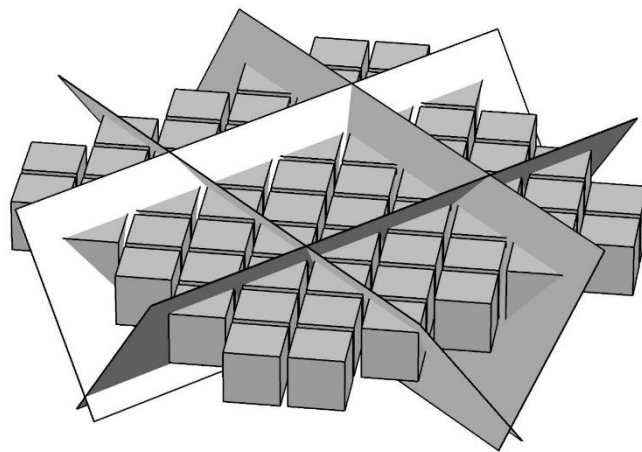
A marási sebességet további tényezők is befolyásolhatják: a marószer adalékanyagai, a marási hőmérséklet, a felület minősége és a felhasznált szelet típusa.



n-típusú szelet esetén a marási sebesség kissé megnövekszik a p-típusú szelethez képest. A koncentráció növekedésével (>20 m/m%) a marási sebesség lecsökken, viszont simább felületek érhetőek el. Egyes források szerint a felületek egyenletessége és a marási sebesség ammónium-peroxo-diszulfát (AP) adalékanyag hozzáadásával tovább növelhetőek, mellyel akár 1,52  $\mu\text{m}/\text{perc}$  is elérhető. [2]

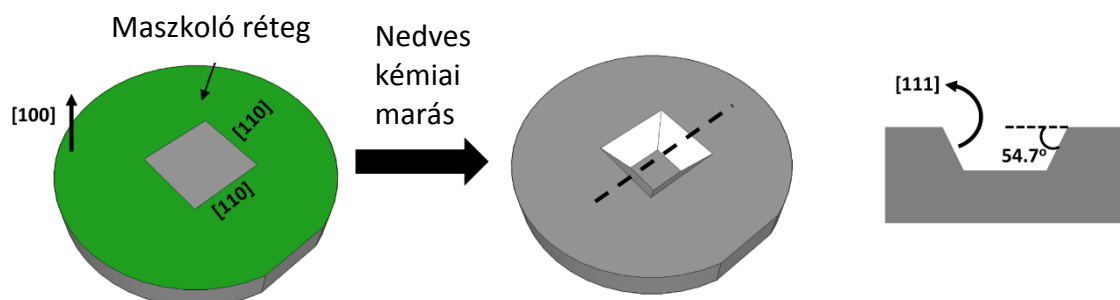
### 3.2.2.3 (100) felületi orientáltságú Si marása

A legegyszerűbb példa egy négyzet alakú ábra segítségével kialakítható üreg. A marás során kezdetben csonka gúla jön létre, majd a négy (111) orientációjú oldalfal találkozásakor inverz piramis alakzat keletkezik.



3.5. ábra: A négy darab (111)-es sík az (100)-ás felületen [26]

Az inverz piramisforma kialakulása után az árok nem mélyül jelentősen tovább. Természetesen kis anizotrópiai hányadosú marószert esetén az (111) oldalfal marásával minimális mélységbeli változás is létrejön.



3.6. ábra: (100)-ás szelet marási profilja [27]

A kialakult üreg oldalfala  $54,74^\circ$ -os szöget zár be a szelet felületének síkjával. Az árok vagy üreg mélységét és alakját változtatni lehet a maszkoló ablak méretével, vagy a marási idővel (kontrollált marás).

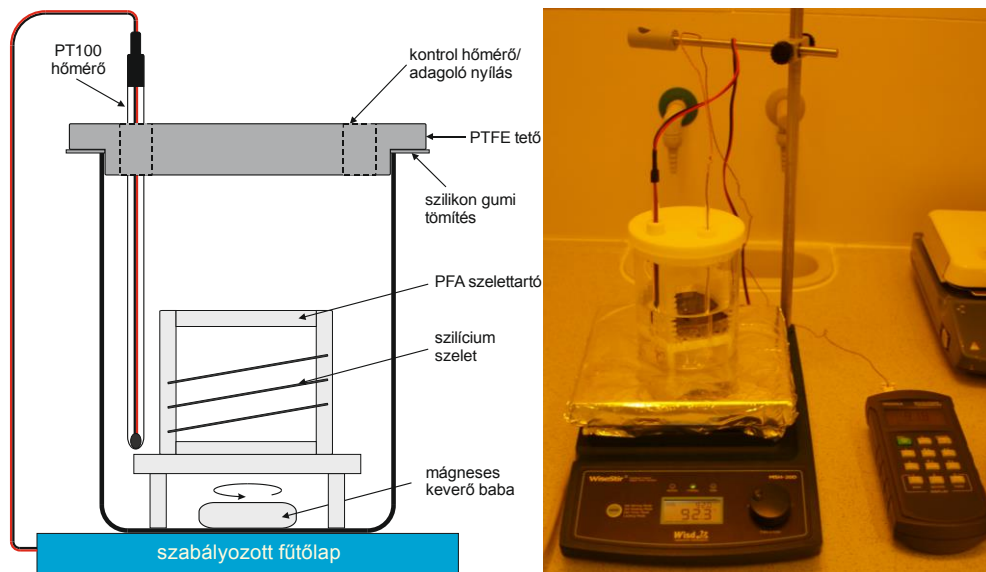
## **4 A hűtőeszközök gyártástechnológiájának kidolgozása**

Ahhoz, hogy egy hűtőeszköz mintázatot a legoptimálisabb módon alakítsak ki, a gyártás előtt szükség volt részletes tervezési lépések alapján a gyártástechnológiák kidolgozására. Munkám során az irodalmi források és előzetes kísérletek alapján részletesen megterveztem a mikroméretű csatornákat tartalmazó hűtőeszközök kialakítására szolgáló technológiai eljárásokat, melynek folyamatát az alábbi fejezetben ismertetem.

### **4.1 Szilíciumba integrált mikrocsatornák kialakítási technológiájának tervezése**

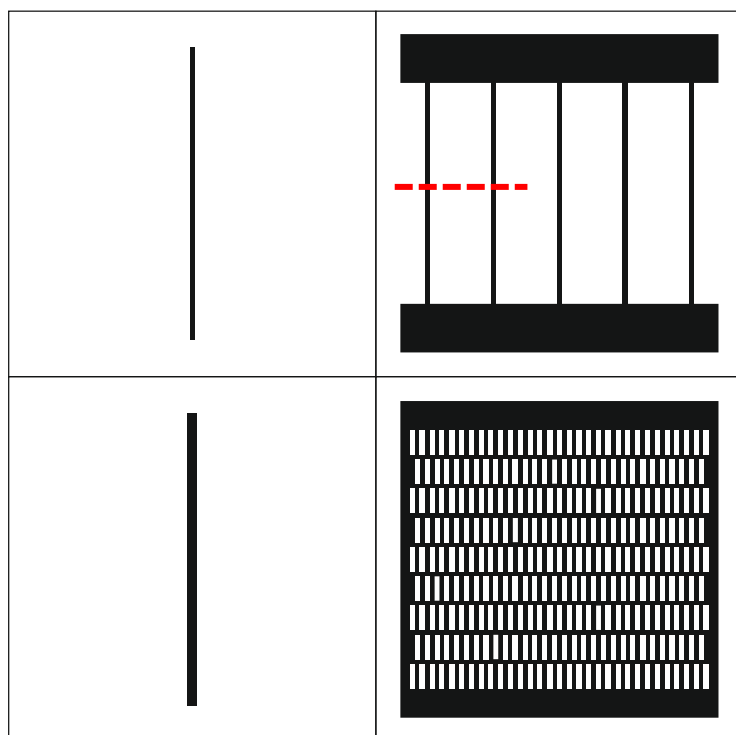
#### **4.1.1 Anizotróp maráson alapuló technológiai sor kidolgozása**

Első kísérleteimet n - típusú, foszforral adalékolt, <100> orientációjú, 5-10  $\Omega\text{cm}$  fajlagos ellenállású, egy oldalon polírozott (single-side polished),  $281\pm 25$   $\mu\text{m}$  vastagságú szilícium szeleteken végeztem. A szilíciumba integrált mikrocsatornák kialakítására TMAH anizotróp marószert választottam. A marási paramétereket Dr. Földváry-Bándy [2] kutatásainak eredményeit felhasználva állítottam be. Ezek alapján 5m/m% TMAH vizes oldatát használtam 2g/l/h ammónium perszulfát adalékanyaggal. A marást 92 °C-on végeztem 200 fordulat/perces keverés mellett. Az adott oldattal sima felületek és 1,5  $\mu\text{m}$ /perc marási sebesség érhető el. A cél körülbelül 100  $\mu\text{m}$  mélységű csatornák kialakítása, így a marási sebességből visszszámolva a minták kialakításához 70 perces marási időt terveztem.



4.1. ábra: A marási elrendezés [2] és egy marás közbeni felvétel

TMAH marószer nagy szelektivitást mutat a  $\text{SiO}_2$  -vel szemben. Marási sebessége mindössze 17,5 nm/óra. Az irodalmi és kísérleti értékekre támaszkodva a csatorna marás során a marás végéig kitartó maszkoláshoz várhatóan 20nm/h száraz  $\text{SiO}_2$  szükséges. 75 perces marási idővel számolva, mely során az elért csatornamélység  $100\mu\text{m}$ , 25-30 nm  $\text{SiO}_2$  maszkoló rétegre van szükség. A réteg kialakítását száraz oxidációs technológiával végezve, az oxidnövekedési szimulátor [28] szerint  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  -on a kívánt oxidvastagság 10 perc alatt érhető el. A technológia sor következő lépéseként ezt az oxidréteget mintázzuk a kialakítandó csatornák szerint. A réteg szelektív megmunkálására a szeleten litográfiai folyamatot alkalmazunk. Az adott vastagságú oxidréteget leválasztás után pozitív fotorezisztrel vonjuk be, majd a 4.2. ábra szerinti maszk illesztését követően, UV fényel világítjuk meg a maszk által nem fedett részeket, melynek következtében a reziszt anyaga roncsolódik. Ezek után a fotorezisztet a megvilágított részokről eltávolítjuk –AZ MIF 726 előhívóval (TMAH alapú, enyhén lúgos oldat). A következő lépés során egy oxidmaróval lemarjuk a leválasztott mintázandó réteget azokról a helyekről, ahol nem védi a fotorezisztet lakk. Végül a maradék rezisztet is leoldjuk a szelet felületéről és így megkapjuk a rétegen kívánt mintázatot.



4.2. ábra: az anizotróp marás során használt maszkmintázat

A marás során kialakítandó csatornageometriákat úgy terveztem meg, hogy a későbbiekben vizsgálni lehessen vele akár egyetlen egy csatorna termikus tulajdonságait is. A két függőleges csatorna 200  $\mu\text{m}$  és 400  $\mu\text{m}$  széles és 12 mm hosszú. A csatornamintázatok között továbbá található két komplexebb csatorna elrendezés. Egy rács típusú, 5 darab 200  $\mu\text{m}$ -es csatornával és egy úgynevezett terelőket tartalmazó rajzolat.

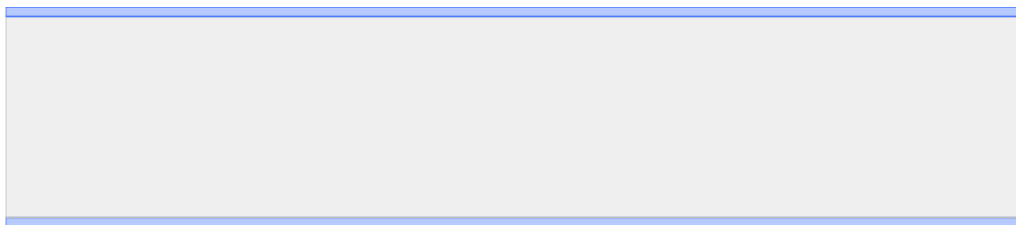
A marás után várhatóan kialakuló csatornák trapéz alakúak lesznek, a szept felszínével 54,7 fokos szöget bezáró oldalfalakkal, és minimális alámaródással. A fotolitográfia és a maszkgyártási technológia minőségének pontatlanságából eredően már a marás megkezdése előtt számítani lehet rá, hogy az alámaródás miatt a kialakítandó alakzatok sarkai eltérő geometriájúak lesznek a megtervezett maszkon található mintákhoz képest.

A megtervezett mikrocsatornás eszköz elkészítéséhez szükség van egy jól definiált technológiai folyamat pontos paramétereit tartalmazó leírására, mellyel biztosítható a gyártás reprodukálhatósága. Az korábbi kísérleteim alapján a csatornák elkészítéséhez a következő technológiai lépéssort állítottam össze, melyet a 4.2. ábra szerinti piros szaggatott vonallal jelölt metszet segítségével szemléltetek.

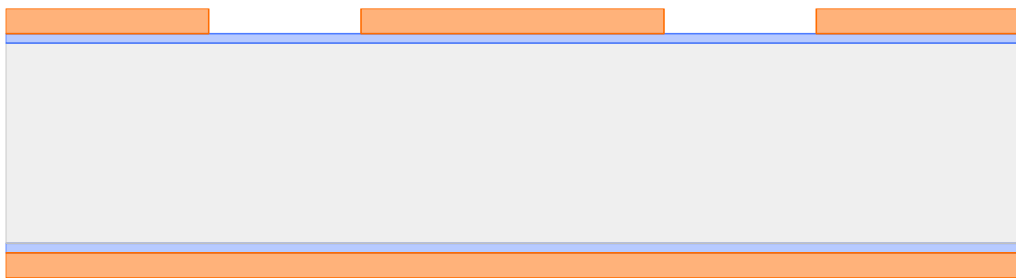
1. Kémiai RCA 1:2 tisztítással a szelet felületéről eltávolítjuk a szerves és fémes szennyeződéseket.



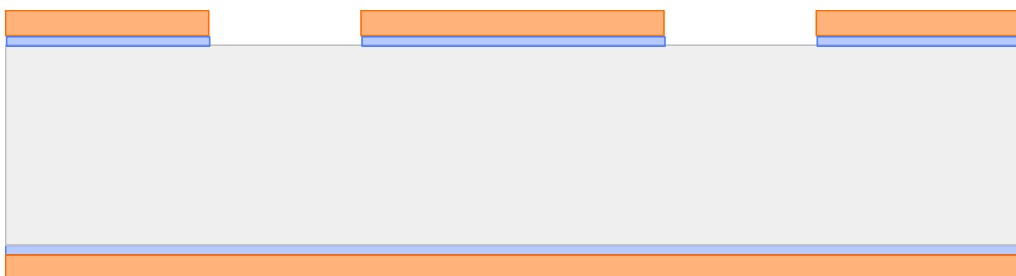
2. Száraz oxidációval 30 nm maszkoló oxid növesztése a TMAH marás ellen,  $T=1100\text{ °C}$ ,  $t=15\text{ perc}$ .



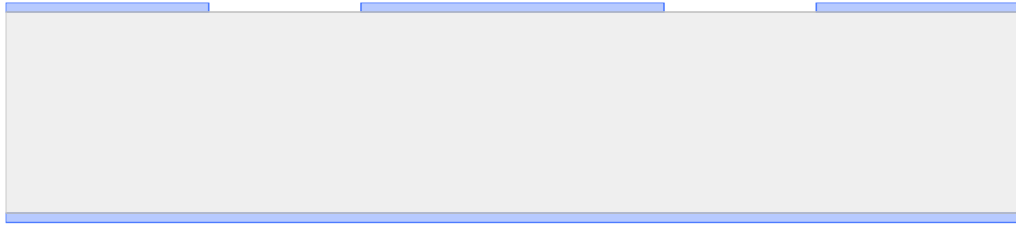
3. AZ1518 fotoreziszt felvitele az elő és hátoldalra. Az előoldal megvilágítása a maszknak megfelelően. Előhívás AZ726 MIF előhívóban,  $t=30\text{ s}$ .



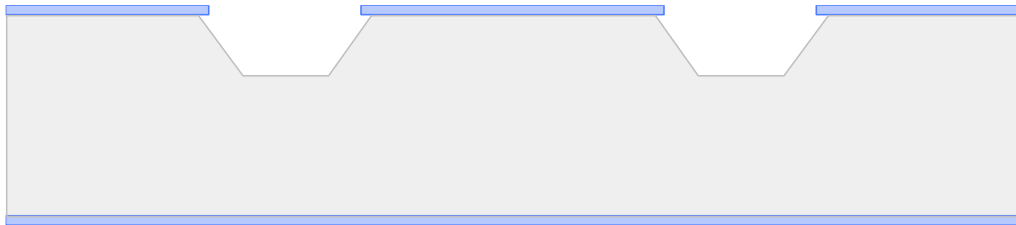
4. Oxidmarás BOE-ban, marás ideje függ az oxidvastagságtól ( $\sim 80\text{ nm/min}$ ),  $t=25\text{ s}$ .



5. Fotoreziszt eltávolítása tiszta acetonban, művelet megismétlése háromszor, vizes öblítés.



6. TMAH marás 5 %-os oldatban,  $m=375$  g (300 g  $H_2O$  + 75 g 25 %-os TMAH). A marás  $T=92$  °C, 200 RPM történik, az oldat hőmérsékletét külső hőmérővel kell ellenőrizni, hogy 92 °C legyen. Marási idő  $t=75$  perc.



7. A szelet berakása után ammónium-perszulfát hozzáadása (2 g/l/h),  $m=0,75$ g.

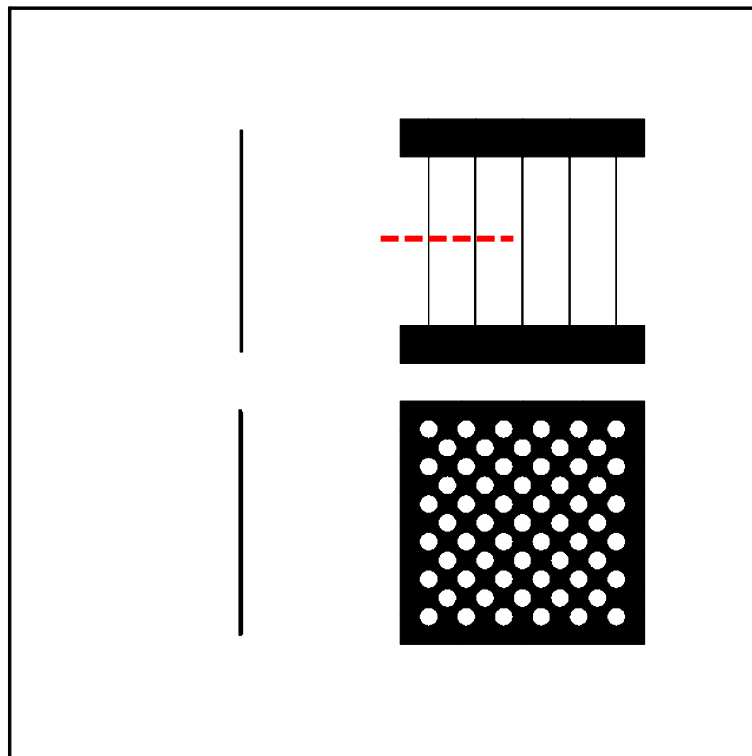
#### 4.1.2 Izotróp maráson alapuló technológiai sor kidolgozása

A fejlesztés során és technológiai megfontolások következtében arra jutottam, hogy a csatorna kialakítására alkalmas lehet az izotróp marás is. Célom a gyártási folyamat idejének csökkentése és egy kevésbé komplex marási technológia kidolgozása volt. Következő kísérleteimet HNA marószerezrel végeztem. A komponensek térfogatszázalékos összetétele alapján 3,5: 1: 0,5 – HF:  $HNO_3$ :  $CH_3COOH$  arányú marószert alkalmaztam.

Előnye, hogy a marási sebesség egy nagyságrenddel nagyobb. Az adott összetétel mellett a marási sebesség 60  $\mu\text{m}/\text{perc}$ . Tehát a kívánt 100  $\mu\text{m}$ -es vertikális geometria eléréséhez csupán egy perc negyven másodperc szükséges. Mivel a marási technológia alából magába foglal egy oxidmarási folyamatot, ezért a szilícium dioxid a marás elleni maszkolásra nem alkalmas, így nincs szükség védőoxid növesztésre. Hátránya, hogy a felület nem olyan egyenletes, mint az anizotróp marás esetén, de a felület ilyen kis felületi

egyenetlenségei mellett, ahol a legnagyobb felületi alakzatok  $20\ \mu\text{m}$  átmérőjűek, de átlagosan  $5\text{-}6\ \mu\text{m}$  kiterjedésűek, a keringtetett hűtőfolyadék hidrodinamikai tulajdonságainak változása (pl.: súrlódási tényező) elhanyagolható a sima felülethez mérten (főleg, ha az áramlás jellege erősen lamináris marad). Hátránya továbbá, hogy a marás során rendkívül toxikus nitrogén-dioxid gáz fejlődik, ezért a marás csak jól elkülönített elszívást tartalmazó térrészben végezhető.

A maszkolóréteget fotoreziszt technológiával alakítottam ki az anizotróp marásnál már látott, az izotróp marásnak megfelelően módosított maszkábra alapján, melyet a 4.3. ábra mutat be. A maszkréteg egy  $40\ \mu\text{m}$  vastagságban felvitt SU-8 epoxi alapú negatív fotoreziszt lakk, mely a marás idejéig ellenáll a HNA marószernek.



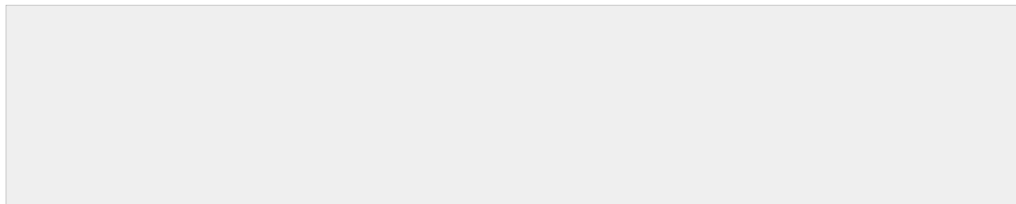
4.3. ábra: Az izotróp maráshoz használt maszk layoutja

A csatornák típusra megegyeznek a TMAH marásnál bemutatottakkal, különbség csak a szélességükben van. Mivel tudjuk, hogy az izotróp marás irányfüggetlen, így amennyit lefelé mar a szilícium szeletbe, annyit oldalra is. Így az általam megtervezett maszkmintázaton a legvékonyabb csatorna minta, az általunk használt maszkgyártási technológia során stabilan elérhető legkisebb csíkszélesség, ami,  $50\ \mu\text{m}$ . Ez alá került egy  $100\ \mu\text{m}$  széles csatorna a maszkra. A rács típusú csatornáknál szintén  $50\ \mu\text{m}$  széles csatornákat terveztem. A negyedik típusú hűtőstruktúra, a hűtőközeg áramlási irányából

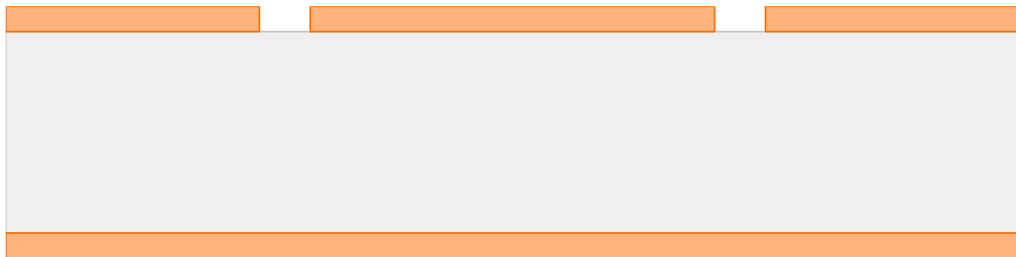
nézve 1 mm átmérőjű „oszlopokat” tartalmaz. A kész csatornákkal szemben támasztott elvárások szerint U-alakú geometriák alakulnak ki, a csatornák mentén lényegesen nagyobb alámaródás várható, mint az anizotróp marás esetén. A csatorna felületén durva, de lekerekített alakzatok jönnek létre.

A mintákat egy lényegesen egyszerűbb, kevesebb technológiai lépést tartalmazó leírás alapján készítettem el:

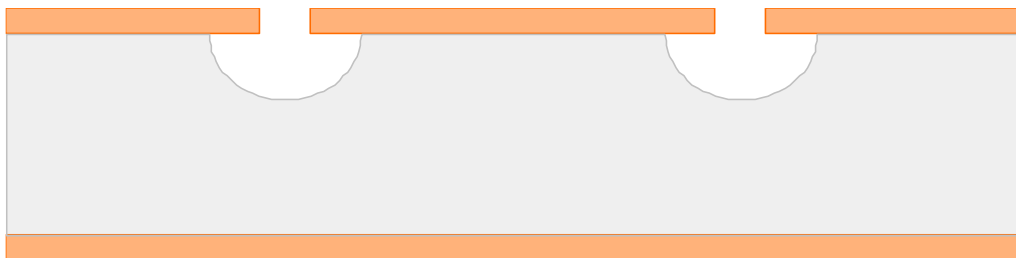
1. Kémiai RCA 1:2 tisztítással a szelet felületéről eltávolítjuk a szerves és fémes szennyeződéseket



2. SU-8 fotoreziszt lakk felvitele az elő és hátoldalra. Az előoldal megvilágítása a maszknak megfelelően. Előhívás SU8 előhívóban,  $t=30$  s.



3. HNA marás 3,5: 1: 0,5 összetételű marószerben,  $l=100$ ml (70ml HF + 20ml HNO<sub>3</sub> + 10 ml CH<sub>3</sub>COOH). Elszívás alatt. Marási idő  $t=1,6$  perc.



4. Lakkeltávolítás és a kész struktúra fűrészelése.



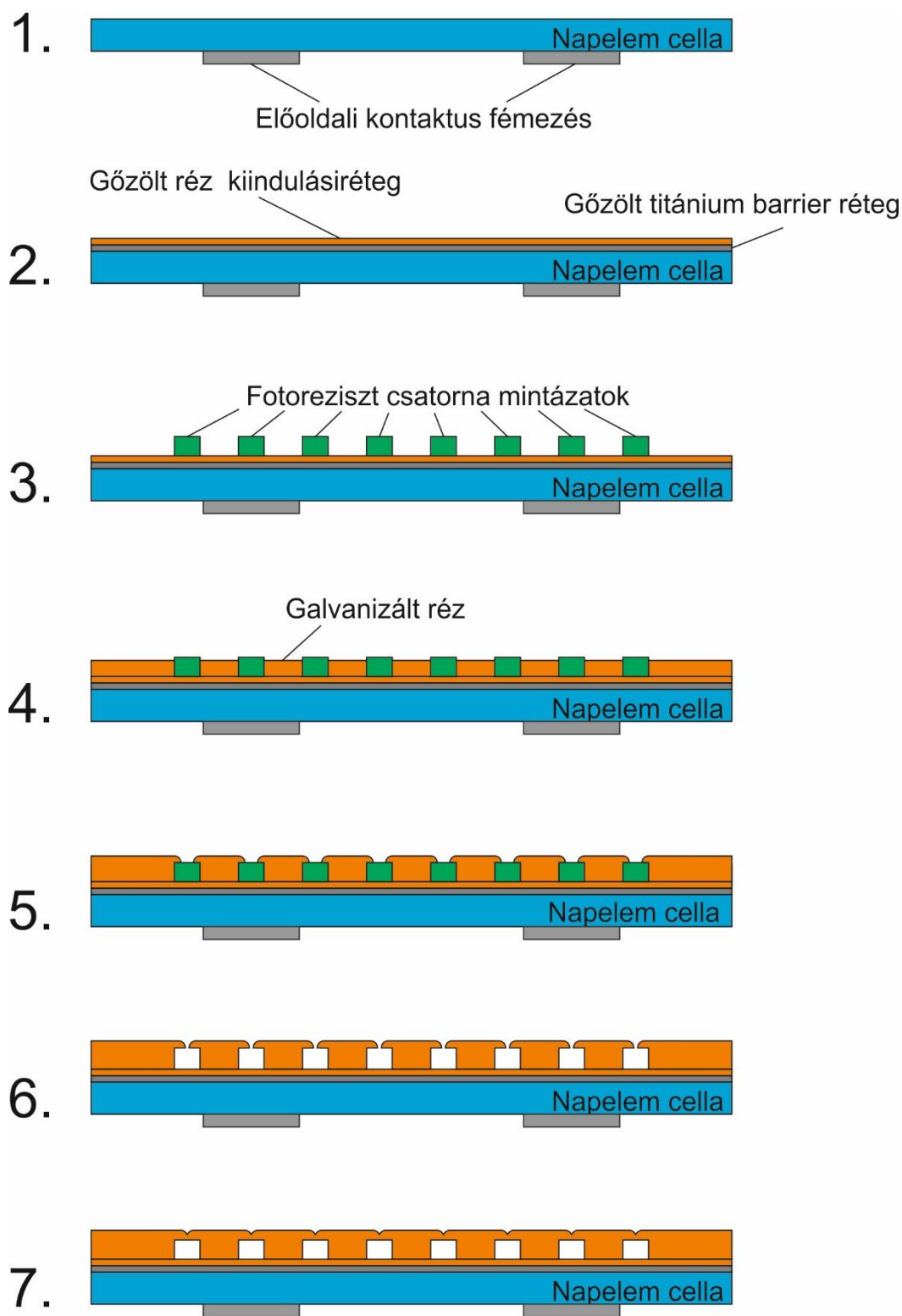
Látható tehát hogy egy ilyen lépéssor megtervezése és elkészítése az alkalmazott technológiák pontos és részletes ismeretét, valamint a gyártáshoz szükséges megfelelő eszközkészlet rendelkezésre állását igényli. Az EET tisztatéri laboratóriumában ezen technológiai lépéssorok segítségével elkészített csatornákon végzett karakterizáló méréseket dolgozatom 5. fejezetében ismertetem.

## **4.2 Napelemcella hátoldali kontaktusrétegén létrehozott réz mikrocatornák kialakítási technológiája**

Az irodalmi forráselemzések alapján javaslatot tettünk egy olyan hűtési megoldásra, ahol a mikrocatornákat közvetlenül a napelem hátsó kontaktus rétegébe ágyazzuk bele. Ezzel a technológiával a 2.4 fejezetben említett hátrányok megszűnnek, úgy, mint a félvezető anyagra vonatkozó megkötések, a mechanikai stabilitás romlása és a termikus interfész használatából fakadó hatások. Az így kialakított struktúra legnagyobb előnye, hogy gyakorlatilag bármilyen típusú napelemstruktúra hátoldalára ráilleszhető és használható annak hűtésére.

### **4.2.1 Hátoldali kontaktusrétegben galvanizálással kialakított réz hűtőcsatornák**

A mikrocatornákat réz galvanizálással terveztem kialakítani a szilícium hordozó felületén, ahol a mikrohűtőt a hátoldali kontaktusfémmezés tartalmazza, így egy jó vezető és olcsó anyagú hátoldali kontaktus alakítható ki a hűtőeszközzel egy technológiai lépésen belül. A csatornák kialakításának technológiai lépéssorát a 4.4. ábra szemlélteti. Első lépés egy kettős rétegű vákuumgőzölt titán és réz kettős réteg leválasztása a napelemünk hátsó felületére, ahol a kb. 90nm vastagságú titán a minél jobb tapadást biztosítja a szilícium felületéhez, valamint meggátolja a rézatomok diffúzióját a szilíciumba, a kb. 180 nm vastagságú vékony rézréteg pedig a galvanizált réz kiindulási rétegeként szolgál. A galvanizált rézrétegben alakítjuk ki a mikrocatornákat lokális rétegnövesztéssel.



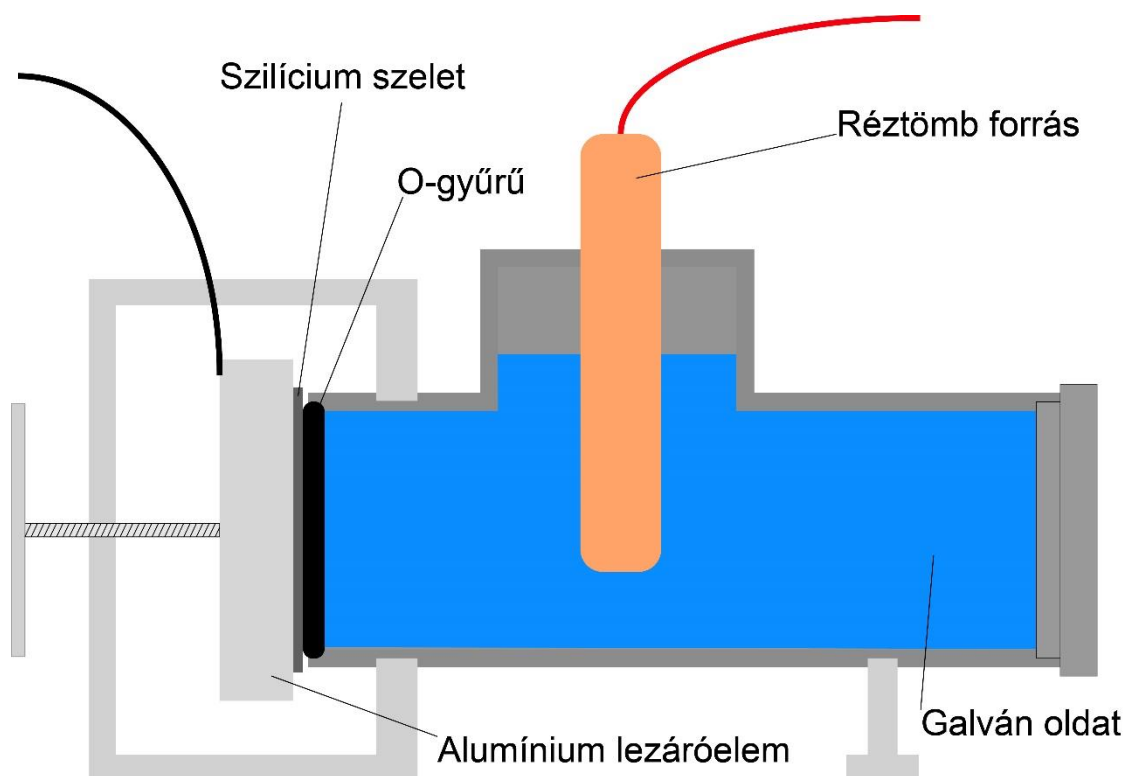
4.4. ábra: A rézcsatornák kialakításának technológiai lépéssora

A következő lépés során a csatornák vertikális dimenzióit fotoreziszt technológiával terveztem kialakítani, melyeknek a mélysége így a rezisztfelvitel paramétereinek megfelelő beállításával elérheti a 70-80  $\mu\text{m}$  körüli értéket. Az alkalmazott fotoreziszt az AZ 125nXT [27] vastag negatív lakk. A negatív lakk annyit jelent, hogy a

felületen kialakuló ábra a maszk ábra negatív képét adja. Lefedve a réz kiindulásiréteg teljes felületét, a lakk UV fényel való megvilágítása és előhívása következik a maszkmintázatnak megfelelően. A negatív lakk tulajdonságából kifolyólag előhívás során ott oldható a lakk, ahol nem lett megvilágítva. Tehát a megvilágított fotoreziszt azokat a területeket fedi le, ahol később a csatornákat és a be- illetve kimeneteket kialakítjuk, és a galvanizált réz a kiindulásirétegen csak a lakk által fedetlen részeken kezd el növekedni a lakk mintázatok között. Amikor a galvanizált réz kezdi befedni a fotoreziszt lakkot és a lakk felett majdnem összezáródott rézmintázat elemei között már csak körülbelül 10-20  $\mu\text{m}$  a távolság, a fotoreziszt lakkot kioldjuk a csatornákból. A lakk eltávolítása után a galvanizálást addig folytatjuk, amíg a réz réteg teljesen össze nem nő a csatornák felett.

### **4.3 Új befogó tervezése**

Az előzetes galvanizálási kísérletek során a laboratóriumban már kész galvanizáló kádát és felszerelést használtam. Azonban a fotolitográfia adottságaiból fakadóan a hordozószelet széleit nem fedte fotoreziszt, így itt is megkezdődött a rézréteg leválasztódása, és az éleken létrejövő rézréteg elvezette a áramot a tesztstruktúra felől, így egyrészt lassú rétegnövekedést tapasztaltam a hasznos területen, illetve a későbbi technológia lépéseket (fűrészelés, mintabefogás, vizsgálatok) megnehezítő, vastag rézperem képződött a szelet kerületén. Ebből kifolyólag szükség volt egy új típusú befogó szerkezet fejlesztésére, amely kiküszöböli ezt a jelenséget, és egyenletes és reprodukálható rétegnövekedést biztosít. Az elkészített befogó sematikus rajzát az 4.5. ábra szemlélteti.



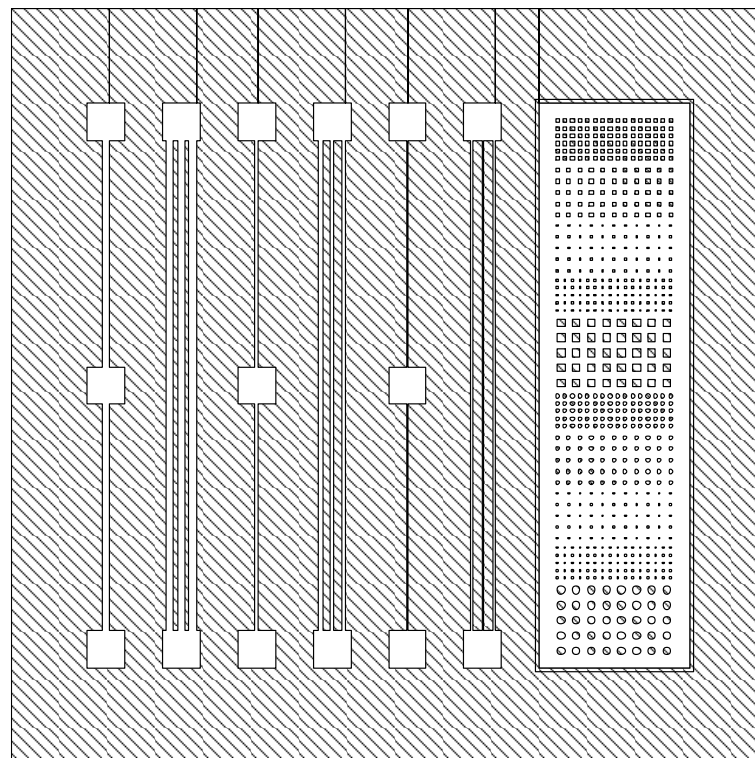
4.5. ábra: A befogószerkezet

Az eszköz egy saválló PVC műanyagból készült. A galvanizáláshoz szükséges anód egy réz tömb, mely a réz ion forrásként szolgál. Az katód pedig a szilíciumszelet felületén található kiindulási rézréteg, ami elektromos kontaktusban van a szilíciumon keresztül a zárófedéllel, mely egy gyorszár segítségével rögzíthető az eszköz megfelelő tömítése érdekében. Tömítésként egy a szelet szélein elhelyezkedő O-gyűrű szolgál, így a széleken növekedő rézréteg által okozott problémákat is kiküszöböltem. A további munkám során ezt az elrendezést használtam a technológia paraméterek további finomításához.

#### 4.4 A galvanizálási folyamat finomhangolása

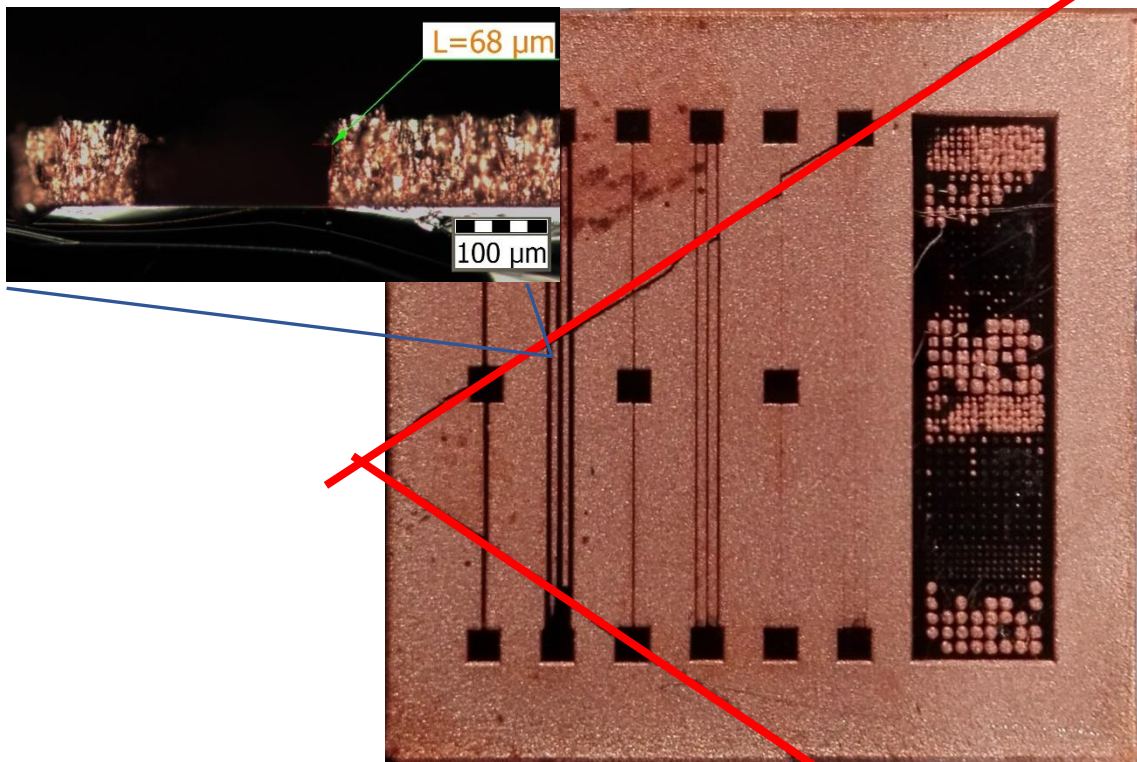
A galvanizálási folyamat megtervezéséhez szükség van a galvanizálandó felület ismeretére, ahhoz, hogy az optimális galvanizálási áramot meghatározhassuk. A kísérleteim során  $20 \text{ mA/cm}^2$ -es áramsűrűséget alkalmaztam. A első kísérleteim során a technológia paramétereinek meghatározásához az általam megtervezett 4.13. ábra szerinti fóliamaszkot használtam a mikrocsatornák kialakításához. Az első kísérletek során alkalmazott lakk az AZ 40XT [31] pozitív vastag fotoreziszt lakk volt, mellyel  $40 \mu\text{m}$  magas csatornák érhetők el. Azonban kiderült, hogy a lakk a hosszú galvanizálási idők alatt elkezd degradálódni. Megrepedezik és a repedések mentén is megkezdődik a réz

galvanizálódása. Így az újabb lakkozási kísérletek során, és később a végleges struktúra kialakításához is, már az AZ 125nXT vastag negatív fotoreziszt lakkot alkalmaztam. Előnye, hogy létrehozhatók vele akár 70  $\mu\text{m}$  magas mintázatok is, valamint időben egyáltalán nem degradálódik, sőt tapasztalataim alapján az idő elteltével a lakk stabilitása növekszik. A tesztstruktúra egy  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  területű alakzat, melyen több mikrocsatorna található eltérő geometriákkal. A layouton található egy 1 darab és egy 3 darab csatornát tartalmazó alakzat, melyek rendre 50, 100, és 200  $\mu\text{m}$  szélesek. Az eltérő szélességekkel azt vizsgáltam, hogy az adott csatorna fölötti rézréteg bezáródásához, mennyi időre van szükség a különböző távolságok esetén. Minden csatorna rendelkezik egy be, illetve egy kiömlő nyílással, mely a hűtőközeg be és kivezetésére alkalmas. A csatornamintázatok mellett található továbbá egy köröket és négyzeteket tartalmazó, litográfiai eljárás vizsgálatára alkalmas ellenőrzőstruktúra 50, 100 és 200  $\mu\text{m}$  es geometriával, ahol a köztük lévő távolság szintén ilyen dimenziókkal változik.



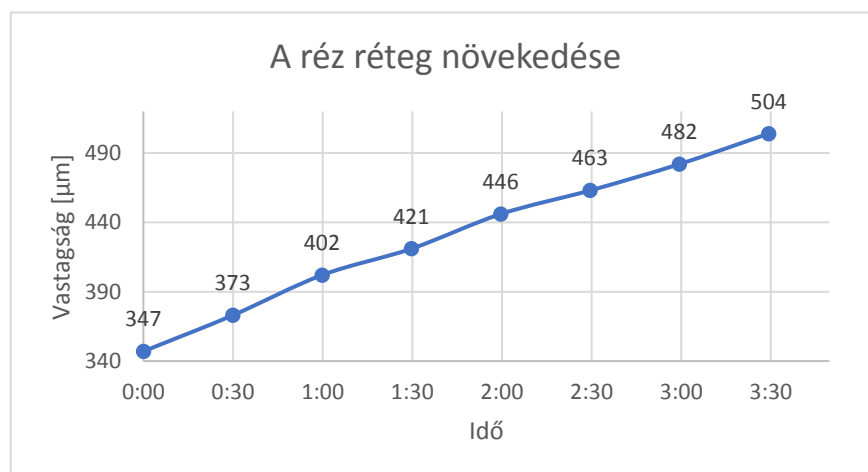
**4.6. ábra: A mikrocsatornás tesztstruktúra layoutja**

A kialakult mikrocsatornákat tartalmazó eszközön a réz a legkeskenyebb csatorna felett körülbelül három óra galvanizálás után ért össze. A 4.7. ábra a 3 és fél óra galvanizálás utáni állapotot tükrözi, ahol már a 100  $\mu\text{m}$  szélességű csatornák felett is néhány helyen megkezdődött a réz réteg összezáródása.



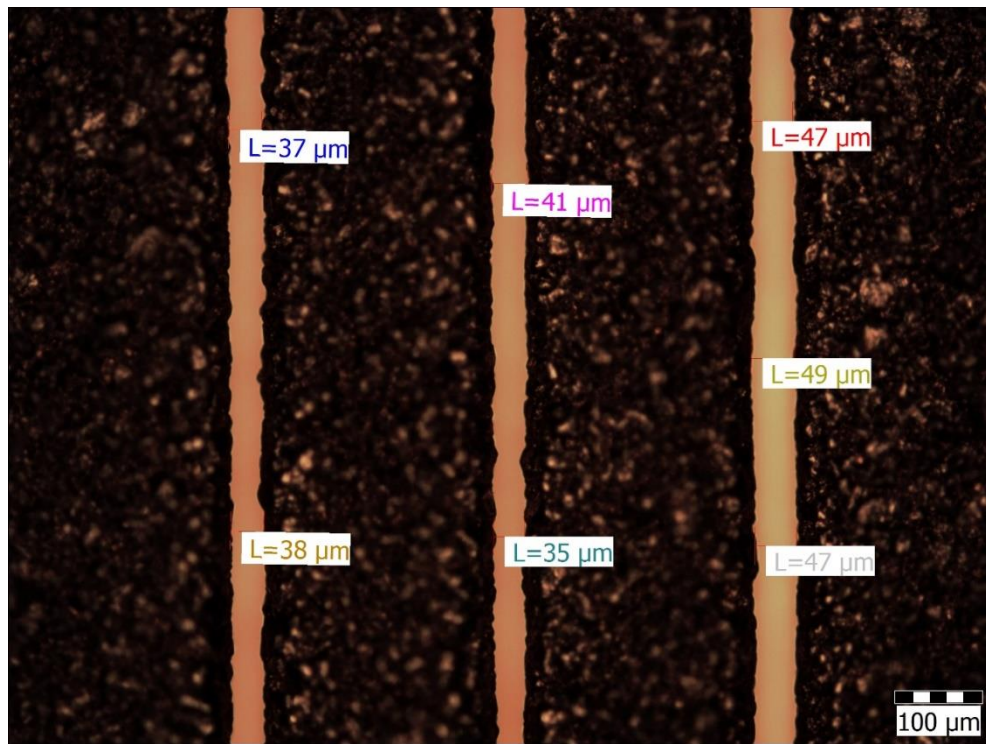
4.7. ábra: A galvanizált mikroméretű réz hűtőcsatornák

A réteg vastagságát fél óránként vizsgáltam a befogóból való kivétellel és szeletvastagságmérő segítségével. A kezdeti vastagság a szilícium szelet és a kétrétegű gőzölt fémréteg együttes vastagsága  $347 \mu\text{m}$ . A kísérlet végén, három és fél óra eltelte után a szelet és a felületén nőtt rézréteg együttes vastagsága  $504 \mu\text{m}$ . Ahogyan a 4.8. ábra is mutatja, hogy a réz az optimális paraméterek mellett időben lineárisan növekszik a szilícium felületén összesen  $157 \mu\text{m}$  a kísérlet végéig. A réteg átlagos növekedési sebessége átlagosan  $42 \mu\text{m}/\text{óra}$  körüli érték, az adott galvanizáló áramsűrűség mellett, mely  $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .

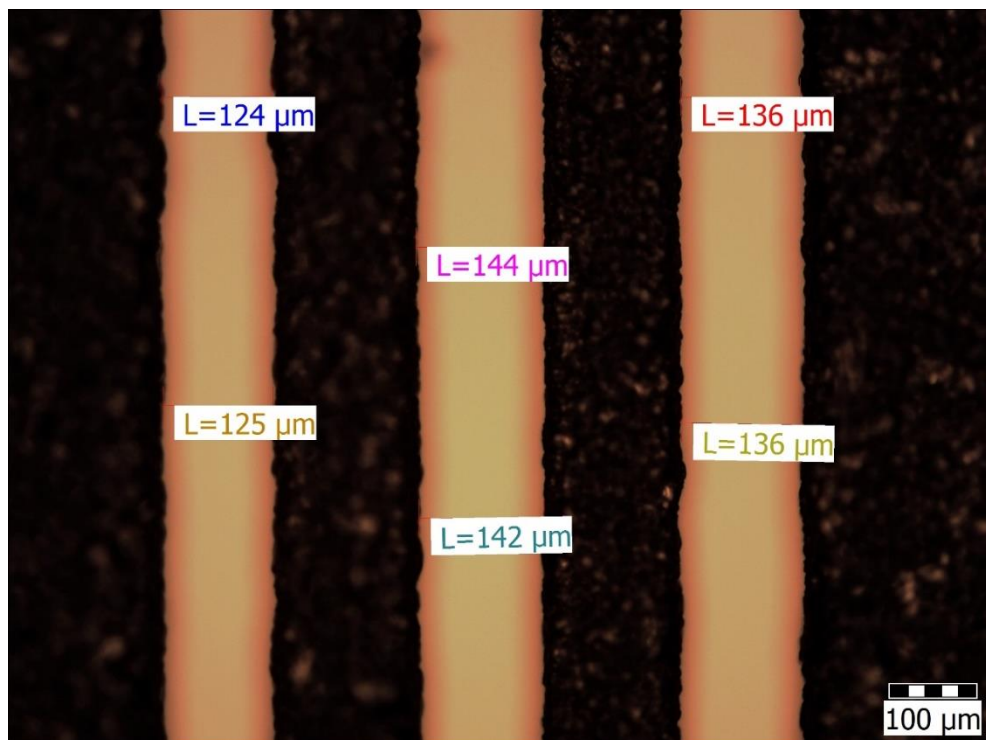


4.8. ábra: A rézréteg növekedése az idő függvényében

A kutatómunka során az előzetes minták elkészítése után a felületi topográfiát, a hibahelyeket és a felületen létrejövő alakzatokat Olympus BX51 optikai mikroszkóppal vizsgáltam, melyet a 4.9. ábra és 4.10. ábra mutat.

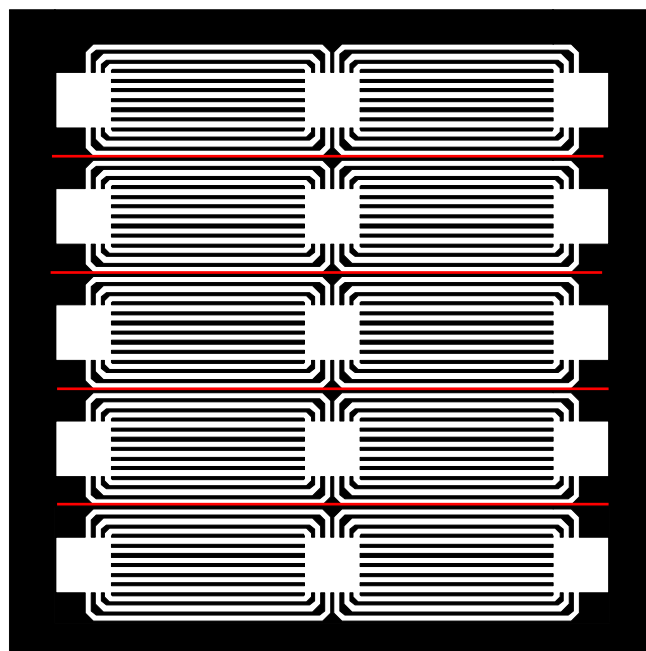


4.9. ábra: A 100 µm széles csatornák mikroszkópos képe három és fél óra után



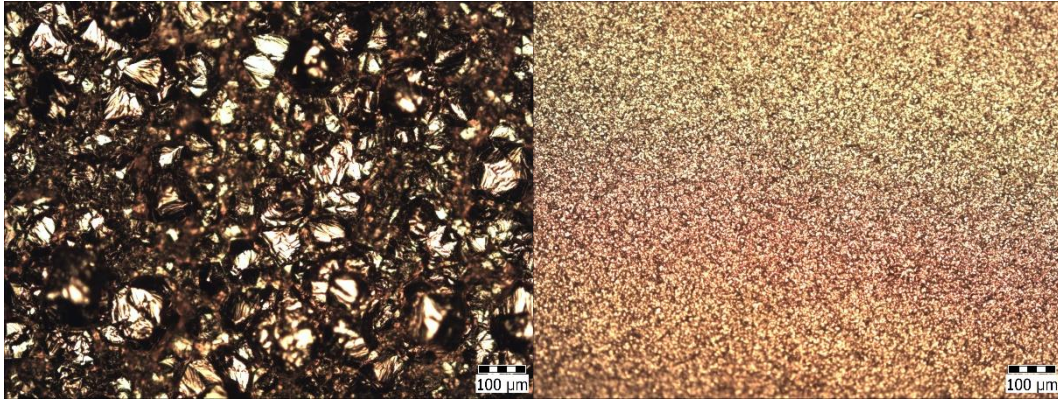
4.10. ábra: A 200 µm széles csatornák mikroszkópos képe három és fél óra elteltével

A galvanizált rézréteg minősége kiváló, nem porózus, jól tapad a szelet felületéhez, azonban a felszínen viszonylag nagy szemcsék alakulnak ki. Előfordul akár 40  $\mu\text{m}$  átmérőjű is. Ez hátrány volt számomra, ugyanis, ha egy ilyen nagyobb gócpont az összezáródási peremnél jön létre, akkor az összezáródás inhomogén lesz, és nem lehet pontosan meghatározni a szükséges 10-20  $\mu\text{m}$ -es távolsághoz tartozó időpontot, amikor a lakkot ki kéne oldani a csatornákból. Tovább nehezíti ennek az időpontnak a meghatározását, hogy a csatornák fölé horizontális irányban lassabban nő a réz, mint felfelé vertikális irányban. A csatornák menti inhomogén növekedési sebesség kiküszöböléséhez és az egyenletesebb réz felület elérése érdekében bevezettem a galvánoldathoz kevert adalékanyag alkalmazását. Az irodalomban talált megoldások szerint [32,33] alkalmazott adalékanyag a Janus Green [34] nevű por alapú vegyületet választottam. A fejlesztés következő iterációja során már egy a 4.11. ábra szerinti új típusú maszkot is alkalmaztam, ami már akár egy kész napelemhűtőeszköz mintázatának is tekinthető. Az ábra alapján a fekete részeken indul meg a réznövekedés és a fehér részek helyen lakk fedi a felületet. A csatornák méretét 200  $\mu\text{m}$  szélesre választottam, ugyanis a litográfia korlátok miatt az 50  $\mu\text{m}$  széles csatornák esetén nem minden esetben alakultak ki a reziszten a maszkmintának megfelelő ábrák, a 100  $\mu\text{m}$  széles csatornákhöz képest pedig a szélesebb geometriának köszönhetően sokkal könnyebben meghatározható az összezáródás előtti lakkeltávolításra megfelelő időpont.



4.11. ábra:



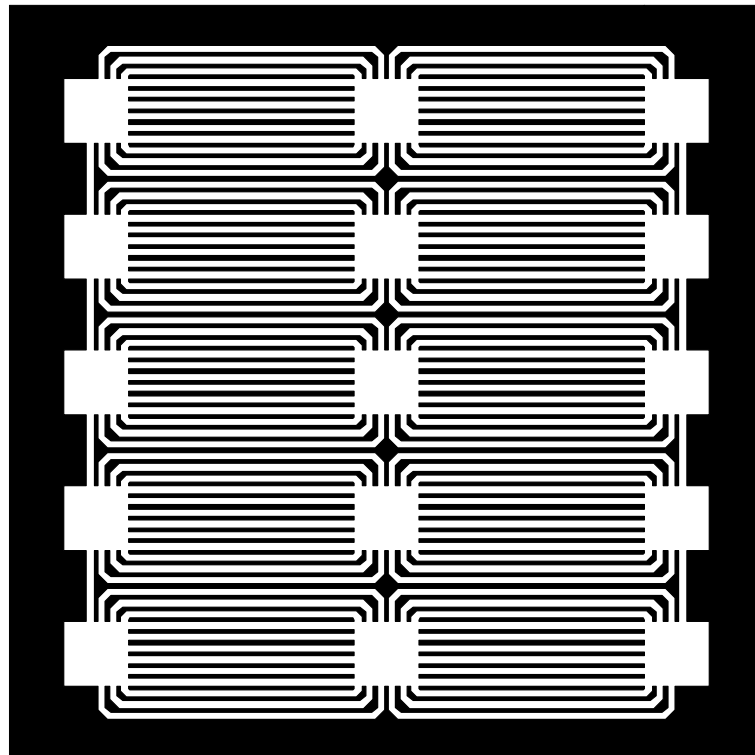


**4.12. ábra: A réz felülete az adalékanyag nélkül (balra) és az adalékanyag hozzáadása után (jobbra)**

Az új kísérletek után a 4.12. ábra alapján látszik, hogy az adalék anyag hozzáadásával jelentősen javult a felület minősége. A kialakuló rézréteg sokkal egyenletesebb, és sokkal kisebb kristályokból áll. Egyetlen negatív tulajdonsága, hogy az adalékanyag hatására lecsökkent a réz növekedési sebessége, mely így a már korábban is használt  $20 \text{ mA/cm}^2$  áramsűrűség mellett  $34 \mu\text{m/óra}$  redukálódott. Valamint a szélső lényegesen nagyobb felületű rézréteggel kontaktusban álló csatornafalak, mely az ábrán piros vonallal van jelölve, jelentősen gyorsabban növekednek, valószínűleg amiatt, hogy a nagyobb felületű rézből sokkal több áram tud átfolyani ezeken a csatornarészekben, mint ott, ahol a rézrétegen mindenhol rezisztlakk zárja körül.

Az optimális galvanizálási technológia kifejlesztése után a végső struktúra kialakításához megterveztem a réz mikrocsatornák végleges geometriájának megfelelő fóliamaszkot, amit az 4.13. ábra szemléltet. A tesztstruktúra egy  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  területű koncentrátoros napelemhez használható hűtőeszköz, ahol a csatorna geometriák a legoptimálisabban vannak elhelyezve az adott napelem területéhez. A layouton található egy 60 darab csatornát tartalmazó alakzat, melyek  $200 \mu\text{m}$  szélesek. A csatornák közötti távolság a csatornák középvonalától mérve  $100 \mu\text{m}$ . A csatornák effektív hossza  $6 \text{ mm}$ . Minden csatorna rendelkezik egy közepén található be-, illetve a széleken egy-egy kiömlő nyílással, mely a folyékony hűtőközeg be és kivezetésére alkalmas. A struktúra összesen 5 darab beömlőnyílást tartalmaz így az egy bevezetéshez tartozó csatornák száma tizenkettő, melyek egyenletesen vannak elosztva a teljes struktúra mentén. A végső iteráció az előző mintázattól annyi eltérést mutat, hogy a szélső csatornák, nagyobb szélső felületekhez való csatlakozásából fakadó inhomogén növekedési sebességét a beömlőnyílások közé helyezett összekötő csatornákkal akadályozom meg. Ezeket később

a lakk eltávolítása után lezárjuk, így megszüntetve a két kivezetőnyílás közti közvetlen kapcsolatot.



**4.13. ábra: A mikrocsatornás tesztstruktúra layoutja**

Az elkészült maszkmintázat és a kifejlesztett technológiai szerint legyártott réz hűtőcsatornákon elvégzett átfolyási kísérleteket és konklúziókat az 5.2 fejezetben ismertetem.

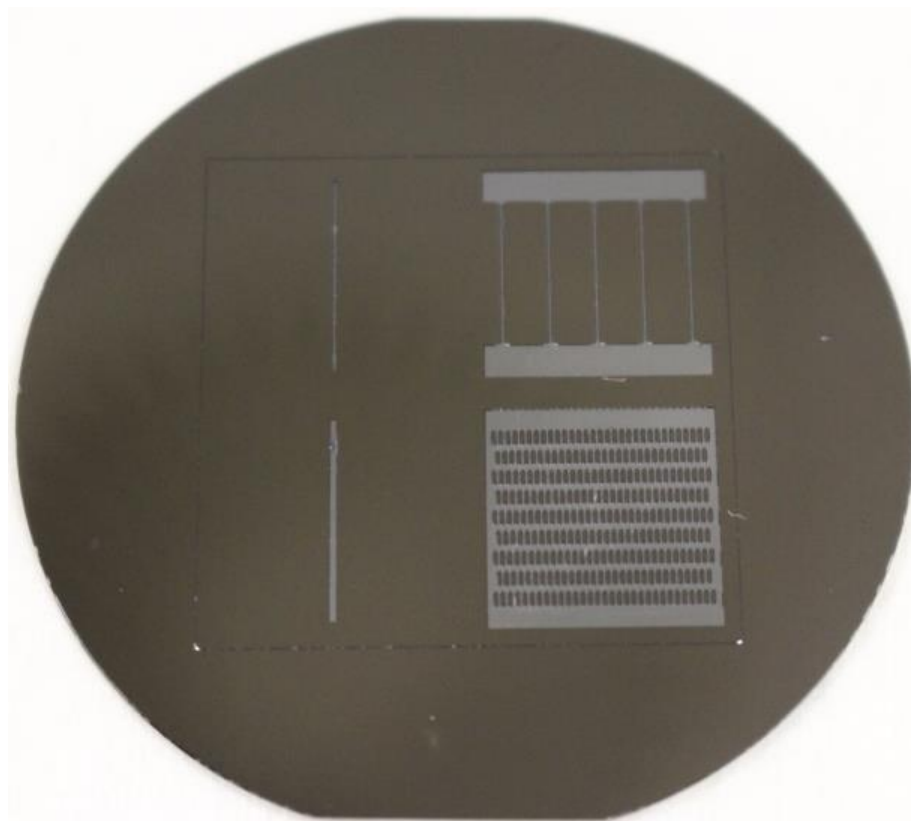
## 5 Kialakított struktúrák mérése és minősítése

### 5.1 Szilíciumba integrált mikrocsatornák

A tömbi megmunkás során szilíciumba integrált csatornákat hoztam létre mind anizotróp, mind izotróp nedveskémiai marással. Az elkészült mintákon végzett méréseket, és a csatornákra vonatkozó konklúziókat a következő fejezetben ismertetem.

#### 5.1.1 Anizotróp marás eredményei

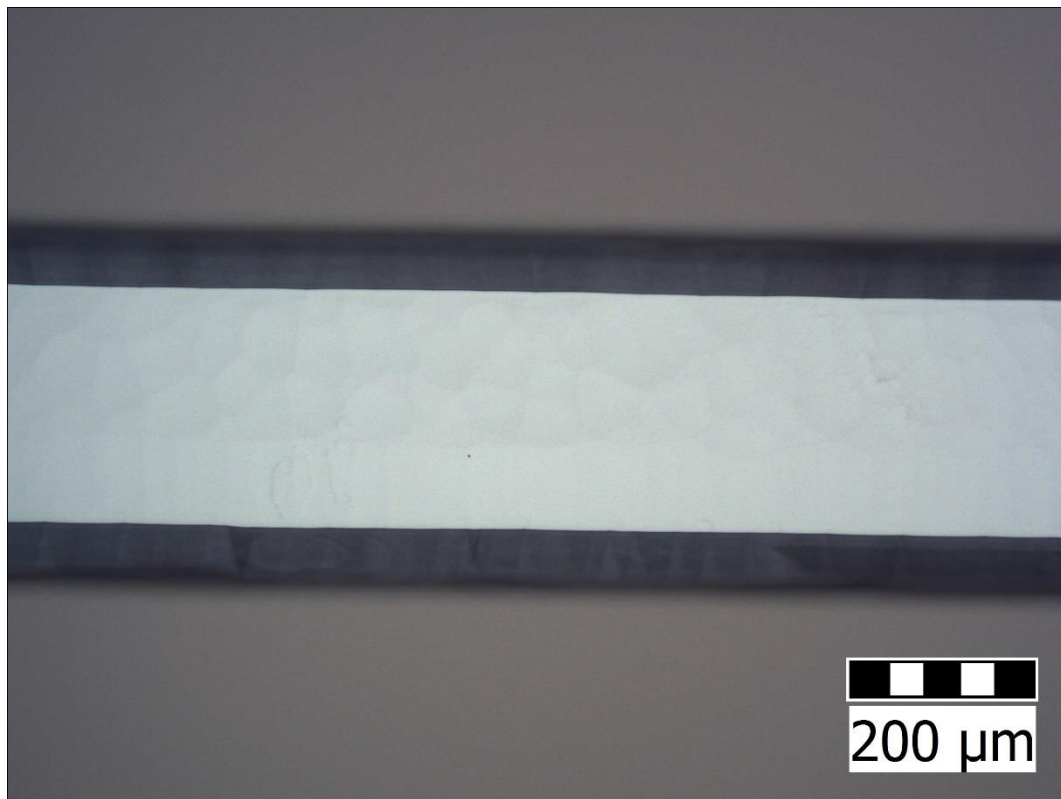
A kutatómunka során a minták elkészítése után a felületi topográfiát, a hibahelyeket és a felületen létrejövő alakzatokat Olympus BX51 optikai mikroszkóppal vizsgáltam. Az elkészült mintáról készült felvétel az 5.1. ábra szemlélteti.



5.1. ábra: Az anizotróp marási eljárással legyártott mikrocsatornákat tartalmazó szilícium szelet

A csatornák geometriáit vizsgálva, felső szélesség a maszkolóréteg szintjén, az alsó szélesség a mart felület szintjén mért eredményeket jelöli. A mélység a két felület között lévő távolságot jelöli, amit az optikai mikroszkóp mikrométer osztású finomfókusz

állító gombjával határoztam meg, 500-szoros nagyítás, azaz minimális mélységélesség mellett.



**5.2. ábra: A csatorna mikroszkópos képe**

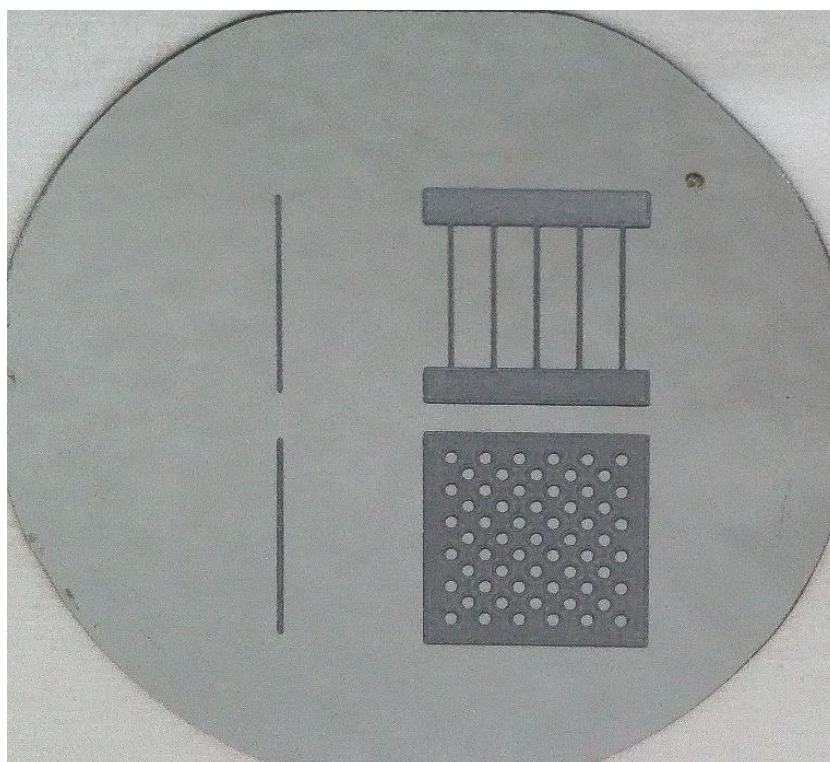
A mért eredmények a vártakkal összhangban a sima falakat és mart felületet bizonyították. A csatornák mentén mért átlagos értékeket a 2. táblázat tartalmazza a 4.2. ábra szerinti számozás alapján. A mikroszkópos vizsgálatok igazolták, hogy a marási profil megegyezik a források alapján várt  $54,7^\circ$  lehajlási szögű oldalfalakkal. A csatorna mélysége közötti szórás kb.  $1 \mu\text{m}$ , mely akár a mikroszkópos mérés pontatlanságából is következhet. A terveknek megfelelően a csatornák mélysége a 75 perces marás után  $94\text{-}95 \mu\text{m}$  mélységűek lettek. A több ponton mért csatornageometriák a csatornák hossza mentén megegyeznek. A kialakult csatorna geometriáit a 5.2. ábra mutatja, ahol az oldalfalak simasága is megfigyelhető.

2. táblázat: A mintázatokon mért átlagos értékek

	felső szélesség [ $\mu\text{m}$ ]	alsó szélesség [ $\mu\text{m}$ ]	alámaródás [ $\mu\text{m}$ ]
1.	211,82	103,97	5,91
2.	208,93	98,46	4,46
3.	404,25	296,95	2,13
4.	205,02	86,48	2,51

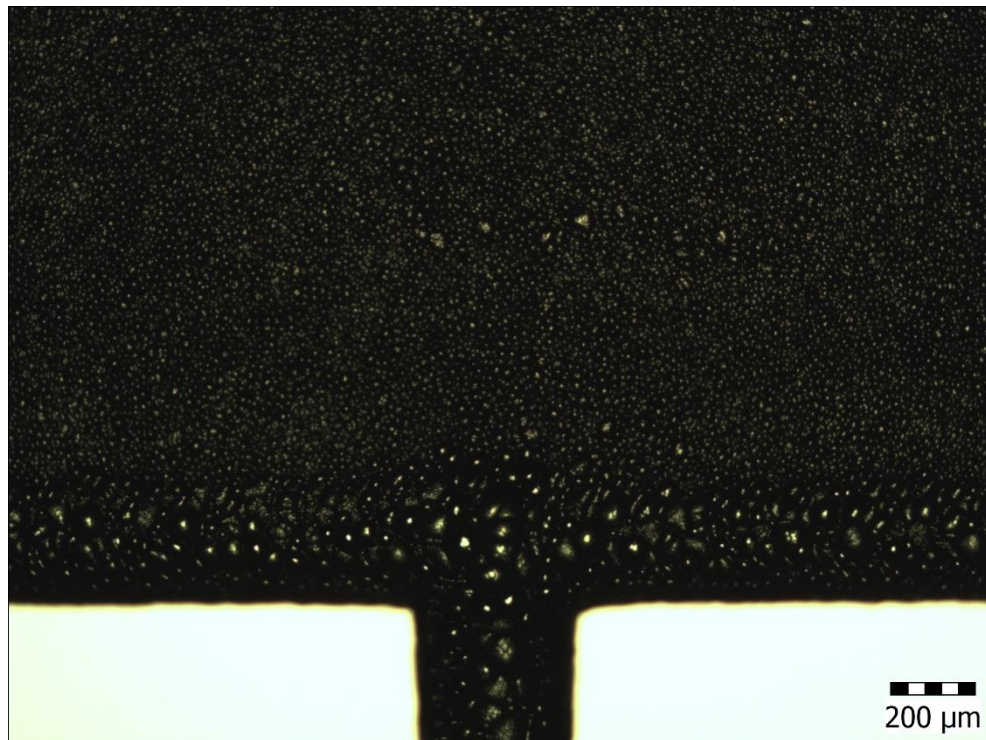
Az elkészült minta alapján kijelenthető, hogy a csatornák megfelelnek víz hűtőközeg általi hűtési eljárások használata során. Valamint a mért értékek a tanszéken futó projekt modellezési és szimulációs feladataiban felhasználhatóak a megfelelő fizikai geometriák modellezésére.

### 5.1.2 Izotróp marás eredményei



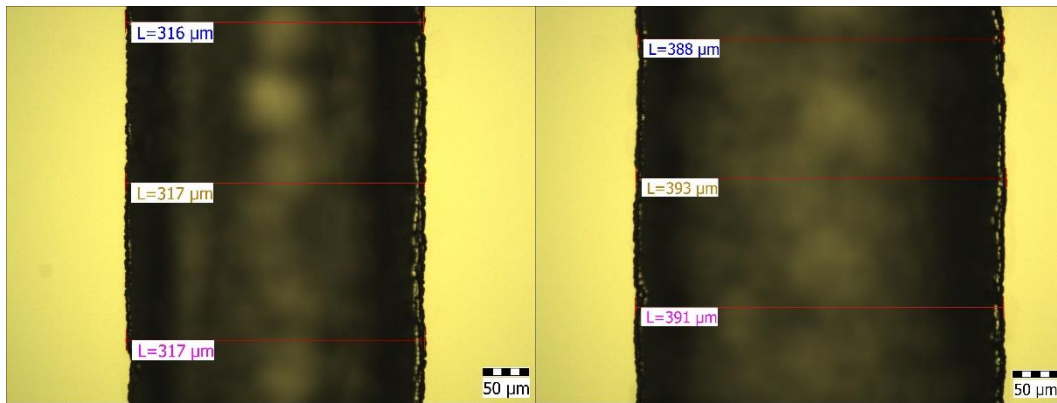
5.3. ábra: Izotróp marással elkészített csatornamintázatok

Az izotróp marás során kialakult struktúrákat az 5.3. ábra mutatja. A csatornák geometriája megfelel az előzetes várakozásainknak. A sarkok és élek a csatornamintázatok mentén lekerekítettek. A maszkrajzolatnak megfelelő eredeti csatornamintázattól (50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ ) eltérően, jóval szélesebb oldalirányban széthúzott U keresztmetszetű árkok alakultak ki, a nagy alámaródás következtében.



**5.4. ábra: A marás során kialakuló felületi topográfia**

A felületen szintén a szakirodalmi feljegyzések alapján és az előzetes feltételezéseknek megfelelően az 5.4. ábra szerinti durva és lekerekített struktúrák alakultak ki a választott marási összetétel alapján. A legnagyobb alakzatok 60-80  $\mu\text{m}$  nagyságúak és megfigyelhető, hogy ezek a durvább felületek a csatornák szélén az oldalfalak mentén alakulnak ki. A csatornák alsó felülete viszonylag egyenletesebb képet mutat itt a legnagyobb szemcsenagyság 10  $\mu\text{m}$  körül mérhető.



**5.5. ábra: A csatornák mentén mért szélességek. Jobbra az 50μm-es, balra a 100μm mikrométeres csikszélességgel indított csatornák**

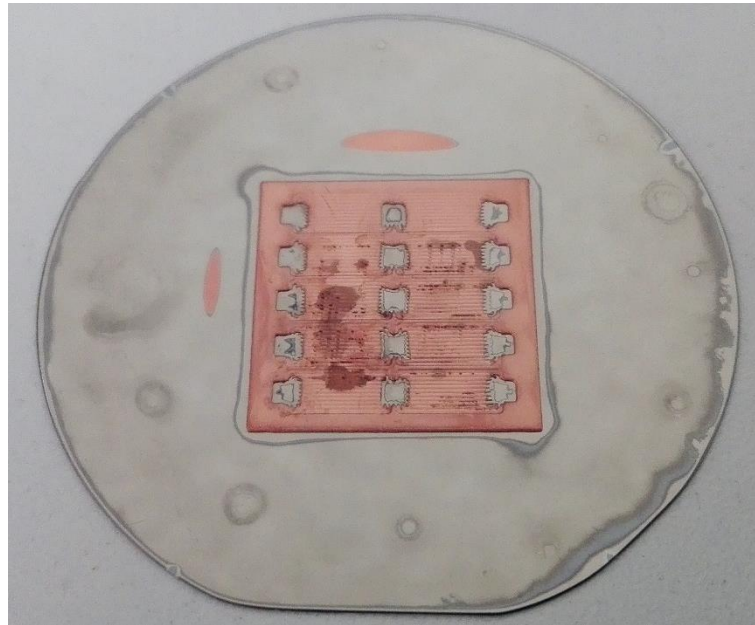
A marás után a csatornák mélysége az előzetes kísérletek alapján meghatározott marási sebességnek megfelelően a 100 másodperces marás során 100 μm mélységű csatornák alakulnak ki a mintázatnak megfelelően a szelet bármelyik pontján, amiből következtetni lehet arra, hogy a marási sebesség a szelet mentén mindenhol egyenletes.

A csatornák vertikális dimenzióit az 5.5. ábra tartalmazza. Látható, hogy a maszkmintázatnak megfeleltethető 50 μm-es és 100 μm-es csatornákból a marás végére rendre 317 μm és 391 μm széles csatornák alakultak ki az alámaródás következtében. Megfigyelhető, hogy a 100 μm-es mélységbeli marástól letérően az oldalirányú marás valamivel intenzívebb visszaszámolva 70-80 μm-el többet mart oldalirányba a marószer, mint függőleges irányban. Valószínűleg az oldalirányú marásintenzitással magyarázható az oldalak mentén kialakult nagyobb alakzatok is.

A kísérletek alapján elmondható, hogy az izotróp marással kialakított integrált csatornák technológiája lényegesen egyszerűbb az anizotróp marásénál. Az elérhető jóval nagyobb marási sebesség mellett, a gyártási technológia is lényegesen egyszerűbb. A kialakított struktúrák megfelelnek folyadék halmazállapotú hűtőközegek keringtetésére.

A kialakult felület felületi simasága ugyan nem éri el az anizotróp marás során kialakult felületek minőségét, de egy más összetételű marószer összeállításával tovább javítható a felület simasága, és kétlépéses, eltérő összetételű HNA-marószereket használó izotróp marással akár polírozott felületnek megfelelő felszín is kialakítható, de ez további kísérletek elvégzését igényli.

## 5.2 Réz rétegben kialakított mikrocsatornák



5.6. ábra: A réz mikrocsatornák a Si hordozón

A 4.4. fejezetben bemutatott technológiai leírást felhasználva elkészítettem a szilíciumra kialakított kettős Ti/Cu rétegre galvanizált mikroméretű hűtőcsatornákat tartalmazó struktúrát, amit a 5.6. ábra segítségével szemléltetek. A lakkeltávolítás és a csatornák bezáródása után a csatornákat izopropilalkoholos (IPA) cseppentéssel vizsgáltam. Egy vékonytűvel ellátott fecskendő segítségével a szélső csatlakozási pontba alkoholt juttatva, a kapilláris hatásnak köszönhetően az IPA végigfut a zárt csatornán belül, és megjelenik a középső csatlakozó pontnál. Megállapítható, hogy a csatornák teljes bezáródása esetén az eszköz alkalmas folyadék áramoltatására, aminek felhasználása később lehetséges megoldást jelenthet a napelemek melegedési problémáira.



## 6 Jövőbeli tervek

A teszt struktúrák legyártása után a következő feladat, hogy ezeket a mikrocsatornákat közvetlenül valamilyen félvezető eszközzel együtt alakítsuk ki. Az eszközöket tartalmazó hordozószelet hátoldalában, vagy annak a felületére. Ezt az integrált csatornák esetében disszipáló diódákkal tervezem megvalósítani. Napelemek hűtésére szolgáló csatornákat pedig egy egyszerű egy darab pn-átmenetet tartalmazó napelem struktúra legyártása után annak hátoldali fémezési rétegén alakítanám ki.

A napelemes hűtőcsatornák esetén, mivel ott alaphól zárt csatornákat alakítunk ki, nincs szükség a csatornák lezárására, azonban az integrált csatornák esetén szükség van egy lezáró elemre, mellyel kialakítjuk a zárt csatornáinkat. A lezárást egy a szilícium hordozóban kialakított csatornamintázatnak megfelelő, beömlő és kiömlő nyílásokat tartalmazó lezáróelemmel tervezem megoldani. A csatornákat és az aktív eszközöket tartalmazó szeletet és ezt a lefedést tartalmazó szeletet pedig ezek után egy eutektikus szeletkötési technológiával tervezek egymáshoz rögzíteni.

Végző cél, hogy a teljes félvezető eszközöket tartalmazó struktúrákon fluidikai és termikus méréseket végezzünk, melynek eredményei felhasználhatóak a párhuzamosan folyó kutatási munkában felállított modellek validációjára.

## 7 Összefoglalás

Az utóbbi évtizedekben a félvezető alapú elektronikus eszközök egyre nagyobb fejlődésen mennek keresztül. Az integrált áramkörök esetén az egyre nagyobb számítási teljesítmény, míg napelemes rendszereknél a nagy besugárzási teljesítmény és átalakítási hatásfokból kapcsolatából adódó hődisszipáció következtében az egységnyi felületre eső hőteljesítmény elérheti az 50-100 W/cm<sup>2</sup>-es értéket is. Mivel ezen eszközök mindegyike jelentős teljesítménybeli változásokat mutat negatív irányban a megemelkedett hőmérséklet hatására, kiemelt fontosságúak az ezen eszközök hűtését célzó kutatási és fejlesztési tevékenységek. Az új típusú hűtőeszközök kifejlesztéséhez minden esetben szükség van először egy gyártási technológia kidolgozására.

Munkám fő célja olyan tesztstruktúrák mintázatának megtervezése és a kialakítására szolgáló technológiai lépéssor meghatározása volt, mellyel a Budapesti Műszaki Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszékén található laboratóriumban elérhető technológiákkal lehetővé vált az eszköz hátoldalán vagy annak felületére mikroméretű hűtőcsatornák kialakítása, mind az integrált áramkörök, mind a napelemek esetén. Az így elkészült mintákon karakterizáló méréseket végeztem, melyek során bebizonyosodott, hogy a terveknek megfelelően a vizsgált értékek minden esetben kielégítették az előzetesen támasztott feltételezéseimet.

Az elkészített tesztstruktúrákkal lehetővé vált – a tanszéken már hosszú ideje futó kutatómunkához kapcsolódó – különböző mikroméretű hűtőbordák hőátadási folyamatainak vizsgálata és karakterizálása, és ezáltal az elkészült modellek validálása.

## Irodalomjegyzék

- [1] Vass-Várnai, A., Sárkány, Z., Rencz, M.,(2012): *Characterisation method for thermal interface materials imitating an in-situ environment*, *Microelectronics J* 43(9):661-66
- [2] Földváry-Bándy E. (2015): *Félig átlátszó egykristályos szilícium alapú napelem cella technológiája és vizsgálata*. Ph.D. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest
- [3] Turmezei, P., (2003): *Napelemes energiaellátó rendszerek katonai célú alkalmazásának kérdései*. Ph.D. értekezés. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem. Budapest
- [4] National Instruments: Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code, <http://www.ni.com/white-paper/7230/en/> (2017 Oct)
- [5] Mizsei, J., Tímárné Horváth, V., (2003): *Napelemek, Segédlet a Napelemek vée9356 tárgyhoz*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
- [6] Plesz, B. (2015): *Kristályos szilícium alapú, vékony fotoaktív rétegű napelemszerkezetek hőmérsékletfüggő tulajdonságainak vizsgálata*. Ph.D. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elektronikus Eszközök Tanszéke, Budapest
- [7] <https://solartribune.com/cpv-system-schematic/> (revision 18:11, 25 Oct 2017)
- [8] A. Royne, C. J. Dey and D. R. Mills, "Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 86, no. 4, pp. 451-483, 2005.
- [9] L. Micheli, N. Sarmah, X. Luo, K. S. Reddy and T. K. Mallick, "Opportunities and challenges in micro- and nano-technologies for concentrating photovoltaic cooling: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 595-610, 2013.
- [10] Yang, K., Zuo, C., (2014): *A novel multi-layer manifold microchannel cooling system for concentrating photovoltaic cells* *Energy Conversion and Management* 89 (2015) 214–221 DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.046
- [11] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 48)," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 24, no. 7, pp. 905-915, 2016
- [12] A. Radwan, S. Ookawara and M. Ahmed, "Analysis and simulation of concentrating photovoltaic systems with a microchannel heat sink," *Solar Energy*, vol. 136, pp. 35-38, 2016

- [13] A. Reeser, P. Wang, G. Hetsroni and A. Bar-Cohen, "Energy Efficient Two-Phase Microcooler Design for a Concentrated Photovoltaic Triple Junction Cell," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 136, no. 3, 2014.
- [14] Napelemek laboratórium, 6. előadás Litográfia és kontaktusréteg <http://www.eet.bme.hu/~plesz/oktatas/napelemlabor/> (2017 Okt)
- [15] Plesz, B., Szabó, P. G., Takács, G., Bognár, Gy. (2017): *Integrated microscale cooling for concentrator solar cells* 2017 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), DOI: 10.1109/DTIP.2017.7984487
- [16] Rehman, U., Lee, S.H. (2015): *Crystalline Silicon Solar Cells with Nickel/Copper Contacts Solar Cells - New Approaches and Reviews* DOI: 10.5772/59008
- [17] Posthuma, N.E., Hernandez, J.L., Lazov, V., Philipsen, H., Prajapati, V., Janssens, T., Van Kerschaver, E., Poortmans, J. (2009): *Investigation of copper plated contacts for silicon solar cells*. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference
- [18] Rothagi, A., Davis, J.R., Hopkins, R.H., Rai-Choudhury, P., McMullin, P.G., McCormick, J.R. (1979): *Effect of titanium, copper and iron on silicon solar cells*. Solid-State Electronics Vol. 23.pp.415-422
- [19] New Zealand Institute of Chemistry: *Electroplating* <https://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8G.pdf> (2017 Okt)
- [20] Le, N. N., Phan, T. C. H., Dang, T. M. D., Dang, M. C. (2015): *Optimization of copper electroplating process applied for microfabrication on flexible polyethylene terephthalate substrate*. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology DOI: 10.1088/2043-6262/6/3/035007
- [21] Takács, G., Bognár, Gy. (2014): *Mikroméretű hűtőeszközök kutatása SoP alkalmazások számára*. Elektronet Magazin 2014/1, Budapest
- [22] Aziz, N.A., Bais, B., Hamzah, A. A., Majlis, Y. (2008): *Characterization of HNA etchant for silicon microneedles array fabrication* IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, 2008. DOI: 10.1109/SMELEC.2008.4770308
- [23] Kovács, G.T.A., Maluf, N.I., Petersen, K. E. (1998): *Bulk micromachining of silicon* DOI: 10.1109/5.704259
- [24] Schwartz, B., Robbins, H. (1976): *Chemical etching of silicon*. J. Electrochem. Soc.: SOLID-STATE SCIENCE AND TECHNOLOGY Vol. 123, No. 12
- [25] Tabata, O., Asahi, R., Funabashi, H., Shimaoka, K., Sugiyama, S. (1992): *Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions*. Sensors and Actuators A Physical, DOI: 10.1016/0924-4247(92)80139-T
- [26] Adljuy, O. (2011): *Crystallography orientation*. Faculty of Electrical and Computer Engineering University of Tabriz, Tabriz, Iran. <http://www.slideshare.net/OmidAdljuy/crystallography-orientation>

- [27] Michael, A., Kwok, C. Y., Al Hafiz, Md., Xu, Y. W. (2013): *Optical Fibre on a Silicon Chip*. InTech, DOI: 10.5772/54246
- [28] BYU Brigham Young University: *Oxide Growth Time Calculator*, <http://www.cleanroom.byu.edu/OxideTimeCalc.phtml> (2017. október)
- [29] BYU Brigham Young University: *Oxide Growth Thickness Calculator*, <http://www.cleanroom.byu.edu/OxideThickCalc.phtml> (2017. október)
- [30] MERCK: AZ 125nXT technikai adatlap (2017 október)
- [31] AZ Electronic materials: AZ® 40XT-11D Photoresist adatlap
- [32] Hasegawa, M., Negishi, Y., Nakanishi, T., Osaka, T. (2004): *Mass-transfer Effect of Janus Green B on Copper Electrodeposition in Submicrometer Trenches* Waseda
- [33] Bokisa, G. S. (2013): *Method for Comparison of Leveling in Decorative Acid Copper Plating*
- [34] Alfa Aesar: Janus Green B adatlap <https://www.alfa.com/en/content/msds/hungarian/A17391.pdf> (2017 Oct)