



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Elektronikus Eszközök Tanszéke

András Levente

FOLYÉKONY FÉM KÖZEGŰ HŰTŐRENDSZER FEJLESZTÉSE

36. Országos Tudományos Diákköri Konferencia

KONZULENSEK

Dr. Neumann Péter Lajos

Dr. Bognár György

BUDAPEST, 2021

Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	4
Abstract.....	5
1 Bevezetés	6
2 Folyékony fém kiválasztása	8
2.1 Higany	8
2.2 Cézium	9
2.3 Francium.....	9
2.4 Rubídium.....	9
2.5 Nátrium-kálium ötvözet (NaK)	10
2.6 Gallium.....	10
2.7 Gallium-ötvözetek	11
2.7.1 Gallium-Indium-ötvözet.....	11
2.7.2. Gallium-Ón-ötvözet	12
2.7.3. Gallium-Indium-Ón-Cink-ötvözet	12
2.7.4. Galinstan.....	12
2.8 Alkalmazható fémek összehasonlítása	13
2.9 Fém kiválasztásának konklúziója	14
2.10 Galinstan és egyéb hővezető közegek összehasonlítása.....	15
3 Mikrocsatornák és maszkok tervezése	17
3.1 Alapmintákat tartalmazó maszk	18
3.2 Virágmintás maszk.....	19
4 Maszkok gyártásának folyamata	20
5 Maszkok mikroszkópos ellenőrzése	22
6 Csatornák gyártásához felhasznált anyagok	23
6.1 Dimetil-polisziloxán (PDMS)	23
6.2 SU-8 fotoreziszt.....	24
7 Tesztminták legyártása	25
7.1 PDMS alap létrehozása	25
7.2 Minták létrehozása SU-8-on.....	25
7.3 SU-8 mintázat mikroszkópos vizsgálata	27
7.4 SU-8 mold kiöntése PDMS-sel	29

7.5 PDMS kiszúrása és rögzítése üveghez	30
7.6 Üveg kicserélése szilícium hordozóra	31
8 Galinstan kikeverése	32
9 Micronit mintatartó használata és tesztelése	33
10 Galinstan sebességének mérése	34
11 Minták hidrodinamikai szimulációja	35
11.1 Sima egyenes virágminta szimulációja	35
11.2 Lapátos virágminta szimulációja.....	36
11.3 Meanderes virágminta szimulációja	38
11.4 Mintázatok összehasonlítása	39
12 Termikus-tranziens tesztelési módszer.....	41
12.1 Mérési elrendezés	42
12.2 Folyékony fémes termikus mérések	43
12.2.1 Sima egyenes virágminta termikus mérése	45
12.2.2 Lapátos virágminta termikus mérése.....	46
12.2.3 Meanderes virágminta termikus mérése.....	47
12.3 Folyékony fémes termikus mérés konklúziója	48
13 Összefoglalás	49
14 Köszönetnyilvánítás	51
Irodalomjegyzék	52
Függelék	56

Összefoglaló

A kutatómunka alapkérdését a korszerű chiplet alapú modern integráció vetette fel. A bennük keletkező extrém magas disszipációsűrűséget valamilyen módon kezelni kell. A legfőbb kérdés az, hogy miként lehetne elkerülni a túlmelegedésüket. A javasolt megoldás egy folyékony fém alapú termikus menedzsment koncepciója, amely hő- és áramlástanai szempontokat is figyelembe vesz. A termikus okokból történő meghibásodás elkerülése érdekében létesíteni kell egy alacsony hőellenállású hőutat a félvezető eszközök által disszipált hő elvezetésére minden elektronikai készülékben, melyet biztosíthatna egy rendkívül jó hővezetési tulajdonságokkal rendelkező folyékony fém közeg. Mivel ez egy meglehetősen új megközelítés, kulcskérdés, hogy miként lehet a jelenleginél hatékonyabb, olcsóbban üzemeltethető és környezetbarátabb hűtési rendszert alkalmazni.

A projekt célja a nagy számítási teljesítményű, chiplet alapú eszközökben felmerülő egyes termikus problémák újszerű és hatékony kiküszöbölése a modern, nagy kivezetésszámú tokozások hátoldalára integrálható mikroméretű csatornahálózatok kialakításával. A mikroméretű csatornákon alapuló folyékony fémes hűtési módszer hatékonysága akár több nagyságrenddel is felülmúlhatja a kényszerített légárammal működő, de akár még a víz alapú hűtőrendszerek hatékonyságát is. A folyékony fém alapú mikrofluidikai rendszer megalkotása és tulajdonságainak megismerése, valamint esetleges továbbfejlesztése a kutatás első számú célkitűzése.

Munkám során elkészítettem különböző lehetséges mikrocsatorna-mintázatokat, illetve megvizsgáltam a választott folyékony fém viselkedését a mintázatokban. Emellett rendszerszintű szimulációkkal térképeztem fel a tesztmintázatok hidrodinamikai tulajdonságait, valamint modellezem a folyékony fém áramlását bennük. Végül termikus méréseket végeztem, mely alapját a termikus-tranziens tesztelési módszer adta. Ezen mérések segítségével össze lehet hasonlítani a folyékony fém alapú hűtőrendszert a kényszerített légárammal működő és a víz alapú hűtőrendszerekkel.

A projekt végére egy olyan komplex folyékony fém hűtőközegen alapuló mikro-hűtőrendszer állhat elő, mely nemcsak egy megoldást adhat a jelenlegi termikus tervezési problémák egy részére, hanem alapjaiban megváltoztathatja a hűtőrendszerekről alkotott elképzeléseket.

Abstract

The idea of the research project was raised by the modern chiplet-based integration. The extremely high dissipation density generated by the chips needs to be handled correctly. Thus the most important question is how to prevent them from overheating. The proposed solution is a concept of a liquid metal based thermal management that takes thermodynamics and fluid dynamics into account as well. A low thermal resistance heat path should be provided to transfer the heat dissipated by the chips to avoid thermal failures in all electronic devices, which could be provided by a liquid metal medium with excellent thermal conductivity properties. Since this is a novel cooling solution, the key issue is how we can design it that way to not only be more effective and cheaper to use but also more environmentally friendly than the current solutions.

The project aims to overcome some of the thermal problems encountered in high-performance chiplet-based devices in a novel and efficient way by designing microchannel networks that can be integrated on the backside of modern high pin-count packages. The efficiency of a liquid metal cooling method based on microscale channels can be several orders of magnitude higher than forced-air or even water-based cooling systems. The primary objectives of the research work are designing the liquid metal-based microfluidic system, understanding its properties and discovering further development possibilities.

During my work so far, I have designed different possible microchannel patterns and investigated the behaviour of the chosen liquid metal in them. In addition, I have used system-level simulations to map the hydrodynamic properties of the test samples and to model the flow of the liquid metal in them. Finally, I have carried out thermal measurements based on the thermal transient testing method. These measurements can be used to compare liquid metal-based cooling systems with forced-air and water-based cooling systems.

By the end of the project, such a complex micro-cooling system based on a liquid metal medium could be produced that not only provides a solution to some of the current thermal design problems but could fundamentally change the way we think about cooling systems.

1 Bevezetés

A technológia gyors ütemű fejlődése lehetővé tette, hogy az első tranzisztor megjelenésétől számítva kevesebb, mint 30 év elteltével komplex és nagy számítási kapacitással rendelkező eszközök kerülhessenek gyártósorra. Ezen eszközök fejlesztését jelenleg több megoldásra váró probléma korlátozza. Egy ilyen akadály a termikus oldalon jelentkezik. A számítási teljesítmény növekedésével többnyire párhuzamosan növekedik a felvett elektromos teljesítmény is, vagyis növekedik a félvezető eszközök által disszipált hőmennyiség. Ezen eszközök esetében a melegedés egy rövid időintervallumban nem okoz számottevő problémát, azonban egy kritikus hőmérséklet felett működésképtelenséghez és irreverzibilis károsodáshoz vezet, így fontos ezt az állapotot elkerülni. Az említett hőmérséklet 125 °C körüli érték [1]. A modern processzorok esetében 55 - 125 W [2], a videokártyák esetében 110 - 270 W [3] körüli érték a maximális teljesítmény, mely a chippek méreteit figyelembe véve nagy teljesítménysűrűséget eredményez.

A chippek esetében a hatalmas teljesítmény kezeléséhez különböző megközelítések léteznek. Egy lehetséges megközelítés, ha a teljesítményt korlátozzák, vagyis a chip tápfeszültségét csökkentik a hőmérséklettől függően. Ebben az esetben a félvezető eszköz nem maximális kihasználtsággal üzemel, tehát a magas hőmérséklet miatt lelassul az eszköz. Egy másik megoldás a külső és integrált hűtőrendszerek továbbfejlesztése. Amennyiben nem kívánatos megoldás a számítási teljesítmény visszafogása, úgy elengedhetetlen egy olyan hűtőrendszer integrálása, amely akár több száz Watt teljesítményt is képes kezelni huzamosabb ideig. A konvencionális hűtőközegeken alapuló hűtőrendszerek már csak nehezen tudják kiszolgálni a hűtési igényeket, így a modern számítógépekben szinte kivétel nélkül a két megközelítés együttese végzi a hőmérséklet szabályozását, vagyis egyszerre van jelen az eszközökben egy nagy teljesítményű hűtőrendszer és szoftveres teljesítményszabályozás is.

Mivel a gyártók többnyire szeretnék minimalizálni a teljesítmény korlátozását, szükséges egy nagyobb hatásfokkal rendelkező hűtőrendszer létrehozása, amely ugyanakkora, vagy még kisebb helyre is integrálható és kompatibilis az eddigi gyártástechnológiákkal. Egy ilyen irány a folyékony fémek felhasználása a hűtőrendszerekben mint hőcserélő közeg. A vízű hűtéses rendszerekhez hasonlóan lehetséges folyékony fémet is áramoltatni, mely elszállítja a megtermelt hőmennyiséget. A folyékony fémek nagy többségének előnye a vízzel szemben, hogy a hőmérséklet-vezetési tényezőjük nagyobb és a forráspontjuk nem limitálja az

alkalmazhatóságot. Bár a hőkapacitásuk töredéke a vízének, nagyobb áramlási sebességek esetén feltehetőleg hatékonyabban lehet velük hőt szállítani. Fontos kihangsúlyozni, hogy a mikrofluidikai kutatások nagy része nem folyékony fémekre vonatkozik, így a hűtőrendszer tervezése és tesztelése során teljesen új alapokra helyezve kell megtervezni és kialakítani a mérés technikát és a tesztelés technológiáját.

Jelen dolgozatban bemutatom a fenti műszaki probléma megoldásához legmegfelelőbb fémeket, valamint különböző mikrocsatorna-struktúrákat és szimulációkkal bizonyítom az új rendszer hatásosságát. Végül termikus mérésekkel mutatom be a tervezett rendszer hasznosíthatóságát.

2 Folyékony fém kiválasztása

Hétköznapi körülmények között csak ritkán találkozhatunk szobahőmérsékleten folyékony halmazállapotú fémekkel, hiszen a felhasználási területük meglehetősen behatárolt. Kivételt jelenthet a higanyos hőmérő, ami mára már elavultnak számít a digitális hőmérőkhöz képest. A szobahőmérsékleten folyékony fémek egy új felhasználási irányzata lehet a folyékony fém közegű hűtőrendszerek területe, ehhez azonban elengedhetetlen az alkalmazási területhez legjobban illeszkedő fém vagy ötvözet megtalálása. A fém kiválasztása egy kritikus pont a tervezés során, ugyanis annak a tulajdonságaihoz kell alakítani a rendszer paramétereit, és figyelembe kell venni a különleges anyagi tulajdonságait. A kiválasztás fő szempontjai a gazdaságosság, környezettudatosság, szilíciummal való kompatibilitás és az élettani hatások. Természetesen a fém anyagi tulajdonságait is számításba kell venni, például az ötvözhetőséget, hőmérséklet-vezetési tényezőt, hőkapacitást és az olvadáspontot. A szobahőmérsékleten folyékony fémek összehasonlítása nagy segítség lehet az adott anyag kiválasztásában, ugyanis ezzel egy reális kép kapható az előnyös és hátrányos tényezőkről egyaránt.

2.1 Higany

A higany olvadáspontja $-38,83\text{ }^{\circ}\text{C}$, hőmérséklet-vezetési tényezője $8,3\text{ W/mK}$. Az alacsony olvadáspont alkalmassá teszi a mikrofluidikában való felhasználást, azonban hőmérséklet-vezetési tényezője nem kiemelkedő, a később tárgyalt fémekétől jelentősen elmarad.

A higany a legismertebb szobahőmérsékleten folyékony fém, viszont felhasználása manapság egyre jobban visszaszorul toxikus hatása miatt. Maga a fém és vegyületei is veszélyesek, érintésük különböző idegrendszeri, emésztési, immunrendszeri panaszokat okozhat. Szervetlen vegyületei, a higanysókat súlyos idegrendszeri elváltozásokat képesek okozni. Szerves vegyületei azonban a legveszélyesebbek, mivel ezek könnyen felszívódhatnak. A WHO besorolása szerint a higany egy azon 10 kemikália közül, amely fokozott veszélyt jelent a közegészségre [4].

A higany egy relatív olcsó anyag, az utóbbi időben egyre jobban elvesztette az értékét a csökkent felhasználásnak köszönhetően. Egy kilogramm ára tisztaságtól függően 60 és 120 ezer forint körül mozog [5].

Napjainkban szigorú rendeletek és jogszabályok korlátozzák a higany felhasználását világszerte. 2013-ban az Unió 26 tagállama aláírta a Minamata Egyezményt, ami előírja, hogy a higany és a higanyvegyületek gyártási folyamatokban történő felhasználását fokozatosan meg kell szüntetni, és e célból ösztönözni kell a környezetre és az emberi egészségre nézve ártalmatlan vagy mindenesetre kevésbé veszélyes tulajdonságokkal rendelkező, a higany helyetti alternatívát jelentő anyagok kutatását [6].

2.2 Cézium

A cézium az alkáliföldfémek közé tartozik, olvadáspontja $28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, hőmérséklet-vezetési tényezője $35,9\text{ W/mK}$. Ezen tulajdonságai miatt megfelelő lenne a fém egy mikrofluidikai rendszerben, hiszen nagyjából négyszer akkora a hőmérséklet-vezetési tényezője, mint a higanyé és az alkalmazás szempontjából megfelelő lehet az olvadáspontja is [7].

A felhasználás ellen szól azonban a fém radioaktivitása és a nagy reakcióképessége is. A radioaktivitás miatti sugárzás negatívan befolyásolhatja az érzékeny áramköröket, és könnyen működésképtelenné teheti azokat. A fém levegővel érintkezve spontán meggyullad, vízbe helyezve robbanékonyan reagál. A heveny reakcióképessége miatt veszélyes anyagként van nyilvántartva.

További negatívum a cézium ára. Egy kilogramm 35 millió forint körül mozog tisztaságtól függően. Ezen fém alkalmazása még kis mennyiségek esetén is gazdaságtalan lenne [8].

2.3 Francium

A francium olvadáspontja $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, amely alacsonyabb, mint a céziumé, azonban magasabb a higanyénál. A hőmérséklet-vezetési tényezője 15 W/mK , ezzel csak a higanyt előzi meg, viszont hozzá képest kétszer akkora.

A fém rendkívül instabil és ritka, ezért a hűtőközegként való felhasználása nem javasolt. További negatív tulajdonsága, hogy radioaktív és a felezési ideje 22 perc [9].

2.4 Rubídium

A rubídium olvadáspontja némileg magasabb, mint az előzőleg tárgyalt fémeké, $39,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli. A hőmérséklet-vezetési tényezője az eddigi anyagokénál is nagyobb, $58,2\text{ W/mK}$ [10].

A céziumhoz hasonlóan rendkívül nagy reakcióképességgel rendelkezik, levegőt érve spontán meggyullad. Vízrel érintkezve is hevesen reagál. Fizikai és kémiai tulajdonságait tekintve is hasonlít a céziumra [11].

A rubídium kissé drágább, mint a cézium, 1 kilogramm ára 40 millió forint körül mozog [8]. Ez is hatalmas negatívum, ha a gazdaságosság elsődleges szempont a tervezendő mikrocsatornás hűtőrendszerénél.

2.5 Nátrium-kálium ötvözet (NaK)

Ezen ötvözet különleges tulajdonsága, hogy $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ az olvadáspontja, ami a higany után a második helyre emeli. A hőmérséklet-vezetési tényezője is figyelemre méltó, $22,4\text{ W/mK}$ [12].

A nátrium és a kálium is nagy mennyiségben rendelkezésre áll, nem drága a bányászásuk és az előállításuk sem. A nagy reakcióképessége miatt azonban különleges bánásmódot igényel. A levegőn tárolva egy sárga oxid réteg képződik a felszínén, amely spontán lánggra tud kapni, valamint vízzel is hevesen reagál. Különleges tulajdonsága még, hogy a teflont is megtámadja [13].

Korábban használták félvezető eszközök hűtésére ezt az ötvözetet, a Danamics LMX Superleggera processzor esetében a NaK szállította a hőt a hűtőbordákhoz [14].

Leszámítva a nagy reakcióképességét és nehéz kezelhetőségét, ez egy megfelelő választás lehet a hűtőrendszerbe a jó hővezetéséből és alacsony olvadáspontjából kifolyólag.

2.6 Gallium

A gallium olvadáspontja $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, hőmérséklet-vezetési tényezője $40,6\text{ W/mK}$. Ezen tulajdonságai meglehetősen jónak számítanak az eddigi fémekkel összehasonlítva, azonban azokkal az előnyökkel is rendelkezik a gallium, hogy ez az első fém jelen felsorolásban, ami nem toxikus, radioaktív vagy instabil [15]. A galliumnak és vegyületeinek nincs semmiféle köztudott mérgező hatása.

Egy kilogramm 99,99%-os gallium ára 530-580 dollár körül helyezkedik el. Ez átszámítva nagyjából 150-180 ezer forint [16]. Ez lényegesen olcsóbb, mint az előzőleg bemutatott fémek nagy része, a higanynál egy kissé drágább. Az ára megfelelően alacsony ahhoz, hogy ezzel a fémrel gazdaságosan lehessen hűtőrendszert tervezni.

További előnyös tulajdonsága a jó kémiai stabilitás. Levegőn hagyva, vagy vízbe téve nem reagál hevesen, vagy robban fel úgy, mint a korábban bemutatott fémek nagy része, bár levegőn oxidálódik a felszíne. Savakkal és alkálikkal azonban reagál és oldódik bennük [17], valamint a halogénekkal erőteljes reakcióba lép [18]. Az alumíniummal történő reakciója széleskörűen ismert és gyakran demonstrált folyamat. A gallium alumíniumra helyezve azonnal elkezd roncsolni molekuláris szinten az alumínium szerkezetét, és függően az alumínium vastagságától, a gallium órákon, perceken vagy akár másodperceken belül szétmálló, laza, törékeny fémmé alakítja azt. A széleskörűen alkalmazott alumíniumból készült hűtőbordák emiatt nem alkalmasak a hűtésre, amennyiben gallium a hőcserélő közeg. A gallium és ötvözetek szinte minden fémre megtámadnak, kisebb-nagyobb mértékben, hosszú távon képesek beépülni a fémek rácsszerkezetébe. Kivétel ezen fémek közül a wolfram és tantál, melyekre a gallium tartalmú fémek nincsenek korrozív hatással.

A szilíciummal szobahőmérsékleten nem lép reakcióba, roncsoló hatása nem jelentős. Kölcsönhatásba csak magas, 800–1100 °C közötti hőmérsékleten lépnek egymással, ez is főleg gyártás közben okoz gondot [19].

A gallium erős nedvesítő és adhéziós tulajdonsággal rendelkezik. Annak ellenére, hogy a felületi feszültsége tízszer akkora, mint a vízé, mégis sok anyagot nedvesít, többek között a szilíciumot is. Ezen tulajdonsága a folyamatosan kialakuló oxidrétegnek köszönhető, azonban a szerepe az adhéziós folyamatban még nem teljesen tisztázott [20]. A nedvesítési tulajdonsága a fém tesztelése során gondot okozhat, ugyanis a nedvesített csatornák falai átlátszatlaná válhatnak, így nehezítve a kísérletek láthatóságát.

2.7 Gallium-ötvözetek

A gallium sok fémmel képes eutektikus ötvözetet alkotni, azonban nem mindegyik alkalmas a hűtőrendszerbeli felhasználásra. Néhány ötvözet olvadáspontja túl magas, vagy nem megfelelő a hőmérséklet-vezetési tényezőjük. Azok, amelyeknek a tulajdonságai megfelelőnek számítanak, többnyire alacsonyabb olvadásponttal, de rosszabb hőmérséklet-vezetési tényezővel is rendelkeznek.

2.7.1 Gallium-Indium-ötvözet

A gallium (75,5%) és indium (24,5%) keverékéből származó eutektikus ötvözet olvadáspontja 15,5 °C, hőmérséklet-vezetési tényezője 26,6 W/mK [21]. Ezen tulajdonságai alapján megfelelő lehet a hűtőrendszerbe való integrálásához.

2.7.2. Gallium-Ón-ötvözet

A gallium (98%) és ón (2%) eutektikus ötvözet olvadáspontja 25–28 °C körüli [22]. Ez magasabb, mint a más fémekkel alkotott gallium ötvözetek, így léteznek nála jobb alternatívák.

2.7.3. Gallium-Indium-Ón-Cink-ötvözet

Ezen ötvözet olvadáspontja 7–8 °C, hőmérséklet-vezetési tényezője 15 W/mK[23]. Ezen tulajdonságai alapján a felhasználhatóság szempontjából hasonlít a Ga-In-ötvözetre. Bár rosszabb hőmérséklet-vezetési tényezővel rendelkezik, mint az említett ötvözet, alacsonyabb az olvadáspontja, ezáltal jó alternatívái lehetnek egymásnak.

2.7.4. Galinstan

A Galinstan olvadáspontja -19 °C, ez a higany után a második legalacsonyabb olvadáspontú fém az eddig felsorolt fémekhez képest. Összetételét tekintve 68,5% gallium, 21,5% indium és 10% ón. Hőmérséklet-vezetési tényezője 16,5 W/mK, ez alacsonyabb, mint a Ga-In-ötvözeté, azonban az alacsonyabb olvadáspont miatt jobb választás lehet [24].

Az indium ára kb. 120 ezer forint kilogrammonként [25], az óné 10 ezer forint körül mozog [26]. Ezekkel az árakkal kalkulálva a Galinstan alapanyagainak ára egy kilogramm elkészítéséhez nagyjából 120-150 ezer forint. Különböző internetes oldalak is közel ezen az áron árúsítják az ötvözetet, természetesen tisztaságtól függően léteznek olcsóbb és drágább alternatívák is [27].

A gallium tartalmú ötvözetek közül a Galinstan a legjobb választás, hiszen ezen fémötvözet olvadáspontja a legalacsonyabb, így az a csatornában nem szilárdul meg még hidegebb külső hőmérséklet esetén sem. Hőmérséklet-vezetési tényezője is jónak mondható az ötvözetek között.

2.8 Alkalmazható fémek összehasonlítása

A fémek hasonlóságai és különbségei egy táblázat segítségével könnyebben áttekinthetők. A táblázat tartalmazza azon anyagi tulajdonságokat, amelyek tudatában egyszerűbb lesz kiválasztani a folyékony fémek rendszer hűtőközegét.

	Olvadáspont [°C]	Forráspont [°C]	Sűrűség (20-25°C) [kg/m ³]	Viszkozitás [Pa*s]	Toxikusság	Hőmérséklet-vezetési tényező [W/m*K]	Elektromos vezetés [S/m]	Felületi feszültség (levegővel) [N/m]	Hőkapacitás (Cp) [J/kg*K]
Galinstan [24][28]	-19	>1300	6440	0,0024	-	16,5	3,46*10 ⁶	0,535- 0,718	296
Higany [29][30]	-38,8	356	13690	0,00155	+	8,3	10,43*10 ⁵	0,486	140
Cézium [7][31]	28,5	671	1873	-	+	35,9	5*10 ⁶	-	242
Francium [32][33]	27	677	2900	-	+	15	-	-	-
Rubídium [10][34]	39	696	1530	-	+	58,2	8,3*10 ⁶	-	364
NaK [12][35]	-12,6	785	867	0,00094	+	22,4	-	-	971

2.8.1. táblázat: A folyékony fémek összehasonlítása

A táblázat tartalmazza a releváns adatokat a szobahőmérsékleten folyékony fémekről, azonban sok adat nem elérhető, vagy különleges mérést igényel speciális és drága eszközökkel. Mivel a francium felezési ideje 22 perc és erősen radioaktív, így a róla szereplő adatok főleg kalkulációk.

2.9 Fém kiválasztásának konklúziója

A bemutatott fémek csak egy töredékét alkotják a Földön megtalálható fémeknek, valamint a felsorolt elemek listája sem teljes, hiszen szinte megszámlálhatatlanul sok ötvözet létezik még rajtuk kívül. Ezen elemek bemutatásának fő célja az volt, hogy a már említett főbb szempontok alapján be lehessen sorolni őket, és választani egy potenciális jelöltet, amely alkalmas lehet a folyékony fémes hűtőrendszer megvalósítására.

A higany nem a legjobb választás, hiszen erősen toxikus és rendeletek is szabályozzák a felhasználását. Emellett nem kiemelkedő a hőmérséklet-vezetési tényezője, valamint a hőkapacitása sem. A cézium és rubídium rendkívül drága, ritka és nagy reakcióképességgel rendelkező anyag, ezért nem jó választások. A francium radioaktív és a felezési ideje 22 perc, ezáltal szintén nem megfelelő a folyékony fémes hűtőrendszerbe. A nátrium-kálium ötvözet megfelelő termikus tulajdonságokkal rendelkezik, azonban a gallium ötvözetek előnye vele szemben, hogy kisebb reakcióképességgel rendelkeznek és nem toxikus hatásúak.

A gallium magában is jó választás lehet, azonban más fémekkel alkotott ötvözei még kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkeznek. Szinte mindegyik ötvözet megfelelő lehet, azonban kiválik közülük a Galinstan ötvözet, amely a legalacsonyabb olvadásponttal rendelkezik, valamint a hőmérséklet-vezetési tényezője is jónak számít.

Összességében elmondható, hogy az összehasonlítás nyertese a fő szempontok (gazdaságosság, környezettudatosság, szilíciummal való kompatibilitás, élettani hatások) alapján, valamint az anyagi tulajdonságok figyelembevételével a Galinstan, hiszen relatív olcsón gyártható, nem toxikus és megfelelő anyagi paraméterekkel rendelkezik. A munkám során ezt az anyagot fogom használni a hűtőrendszer tervezéséhez.

2.10 Galinstan és egyéb hővezető közegek összehasonlítása

Ahhoz, hogy a folyékony fémes hűtőrendszer értelmét igazolni lehessen, érdemes összehasonlítani a választott folyékony fémeket a gyakorlatban széleskörűen alkalmazott hővezető közegekkel. Ehhez segítséget nyújthat az alábbi táblázat, ami tartalmazza azon releváns anyagi tulajdonságokat minden közeg esetében, amely befolyásolja az alkalmazásuk hatásosságát.

	Halmazállapot szobahőmérsékleten	Ár [Ft/kg]	Olvadáspont [°C]	Sűrűség (20-25°C) [kg/m ³]	Viszkozitás [Pa*s]	Hőmérséklet-vezetési tényező [W/m*K]	Elektromos vezetés [S/m]	Hőkapacitás (Cp) [J/kg*K]
Galinstan [24][28]	Foly.	130 ezer	-19	6440	0,0024	16,5	3,46*10 ⁶	296
Szilícium [36][37][38]	Szil.	3 ezer	1410	2330	-	150	1,56*10 ⁻³	700
Thermal Grizzly Conductionaut [39][40]	Foly.	>2 millió	10	6240	0,0021	73	-	-
Víz [41][42][43]	Foly.	0,218	0	997	0,00089	0,598	5*10 ⁻³	4182
Levegő [44]	Gáz	-	-	1,208	-	0,024	1,2 *10 ⁻¹²	1000
Alumínium [38][45][46][47]	Szil.	880	660	2700	-	237	3,5*10 ⁷	910
Réz [38][46][48][49]	Szil.	3 ezer	1356	8960	-	413	5,96*10 ⁷	390
Szilícium-karbid [50]	Szil.	1-2 ezer	2730	3100	-	120	-	750

2.10.1. táblázat: A Galinstan és egyéb hővezető közegek összehasonlítása

Látható a táblázatban, hogy a bemutatott anyagok meglehetősen különböznek a tulajdonságaikban, azonban a felhasználásukban már annál kevésbé. Az anyagok kivétel nélkül megtalálhatók a modern elektronikai eszközök nagy részében mint egy fajta hővezető vagy

hűtőközeg. A félvezető eszközök nagy részének alapját a szilícium adja, ami rendkívül jó hővezetés szempontjából. Meglehetősen olcsó anyag és a Galinstan fémrel is kompatibilis. A Thermal Grizzly Conduction Paste alapját szintén gallium adja, így az anyagi tulajdonságok hasonlóságai szintén ezzel magyarázhatók. Az ára rendkívül magas, így a folyékony fémes rendszerben történő alkalmazása mint hűtőfolyadék nem gazdaságos. Ezzel szemben a víz rendkívül olcsó az eddig tárgyalt anyagokhoz képest. A víz alapú hűtőrendszerek növekvő népszerűségnek örvendenek. Feltehetően azért, mert a víz olcsó és könnyen cserélhető hűtőközeg, valamint a hagyományos, kényszerített légárammal működő hűtési megoldásokhoz képest nagyobb hűtési teljesítményt kínál. Amennyiben megvizsgáljuk a táblázat következő két elemét, a hagyományos hűtőbordák alapanyagait láthatjuk. Az alumínium a legelterjedtebb hűtőborda-alapanyag, ami az alacsony árral és jó termikus tulajdonságokkal magyarázható. Ennél nagyobb hűtési teljesítmény érhető el, amennyiben az alumíniumot rézre cseréljük. Bár drágább, a hővezetése majdnem kétszeres. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy közel kétszer akkora hatékonysággal szállítja el a félvezetők által disszipált hőmennyiséget. A szilícium-karbid még nem olyan mértékben elterjedt, mint a szilícium, azonban már alkalmazzák nagy teljesítményű félvezetők esetén. Hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, mint a szilícium, azonban magasabb hőmérsékletet is elvisel, így nem szükséges hűteni olyan mértékben a szilícium-karbid eszközöket, mint a szilícium alapúakat.

Fontos kiemelni, hogy a bemutatott anyagok többnyire kombinálva vesznek részt az elektronikus eszközök hűtésében, vagyis a különböző hővezetéshez alkalmazott elemek más-más anyagból készülnek. Egy példa lehet erre, ha a félvezető szilíciumból készült, a hűtőborda pedig rézből. A két anyag között nem tökéletes az érintkezés a felületi érdességből kifolyólag, így használnak a kitöltésre egy hővezető pasztát, ami kitölti az apró eltéréseket. A víz alapú hűtések esetében a hűtőborda és a félvezető eszköz között található egy zárt vízkör, ami a hőt szállítja a két elem között. Ez hasznos lehet, mert így nem szükséges a nagy hűtőbordákat a félvezető eszközre helyezni, ezzel helyet spórolva. Mivel a víz hőmérséklet-vezetési tényezője elmarad a Galinstanétól, így értelmet nyerhet a folyékony fém alkalmazása. Bár egy egységnyi Galinstan a víznél kevesebb hőt tud szállítani a kisebb hőkapacitása miatt, azt hamarabb fel tudja venni, így nagyobb áramlási sebesség mellett, feltehetőleg hatékonyabban tudja hűteni a hőt termelő eszközt. A folyékony fémes hűtés ötlete tehát megalapozott, a munkám során szimulációkkal és mérésekkel fogom alátámasztani a fémes hűtőrendszer hatásosságát.

3 Mikrocsatornák és maszkok tervezése

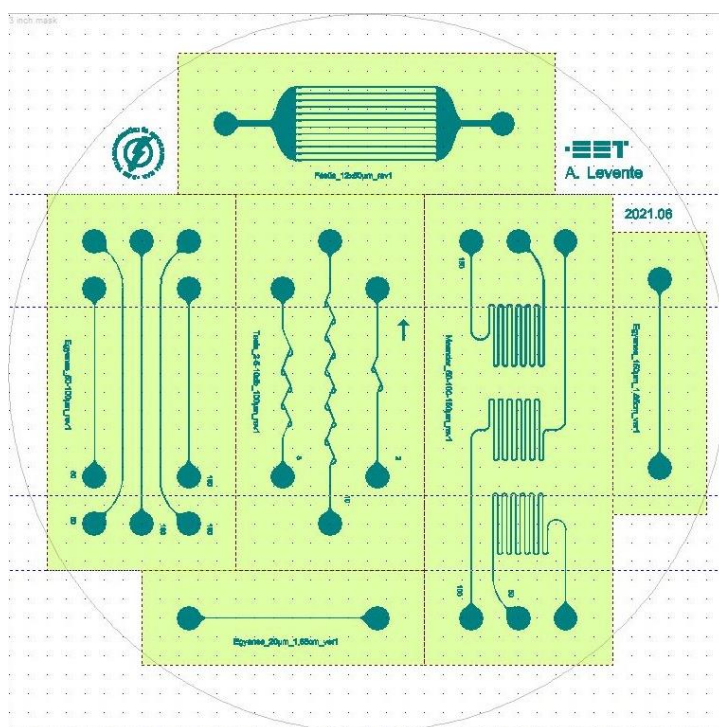
A csatornák méreteinek és alakjainak tervezése egy kritikus feladat, gondos munkát igényel a megfelelő paraméterek megválasztása a hűtési teljesítmény maximalizálásának érdekében. A hűtési teljesítmény nagyban függ az áramoltatott anyagtól és a csatorna dimenzióitól. A folyadék hőkapacitása, sűrűsége és hőmérséklet-vezetési tényezője fontos paraméter a kalkulációk elvégzésekor. A csatorna esetében a hosszúság, az átmérő és a keresztmetszeti alak a meghatározó. Az áramlást leíró tényezőkkel is szükséges számolni, ilyen a folyadék sebessége és az áramlás típusa. A folyadék, vagy folyékony fém esetünkben adott, ez a Galinstan, amelyet már előnyben részesítettem a többi folyékony fémmel szemben. A változtatható paraméterek ebben az esetben a csatornák méreteivel és az áramlás tulajdonságaival kapcsolatosak.

Nehezen lehet azonban tökéletes struktúrát tervezni, ugyanis az optimális kialakítás erősen függ a hűtendő félvezető eszköz méretétől és annak hőtermelésétől. Nagyobb disszipált hőmennyiség esetén több folyékony fémmre van szükség, hogy képes legyen elszállítani azt. Ez azt implicálja, hogy nagyobb csatornakeresztmetszet és nagyobb áramlási sebesség szükséges. Nem lehetséges azonban ezeket a paramétereket korlátozás nélkül változtatni, ugyanis az áramlási sebesség szorosan összefügg a nyomással, amit ha túlságosan nagyra választunk, úgy a csatornák szétrepedhetnek, és a folyékony fém kiáramolhat a csatornákból. Túlságosan nagy csatornák esetében gyengül a struktúra, de már kisebb nyomás esetén is megtörténhet a csatornák szétnyílása. A megfelelő egyensúly megtalálása a paraméterek között elengedhetetlen, ezért terveztem különböző tulajdonsággal rendelkező mintákat, melyek segítségével kitapasztalhatók az optimális csatornaméretek és az áramlással kapcsolatos értékek.

A mintázatok maszkjait a CleWin nevű programmal terveztem meg. A programban különböző rétegeken lehetséges a kívánt mintázatok kialakítása, valamint lehetséges műveleteket végezni velük pl: Merge, Intersect, XOR stb. A munkám során 2 darab nagy maszkot készítettem az alapminták felhasználásával és kombinálásával. Ezen maszkok közel maximálisan kihasználják a rendelkezésre álló helyet, amelyet a 3 inch-es szilíciumlapka mérete határoz meg. A maszkok tervezésekor figyeltem, hogy ne kerüljön egy minta sem túl közel a szelet széléhez, ugyanis ott nem garantált, hogy sérülés nélkül kibírják a gyártás technológiai lépéssorát.

3.1 Alapmintákat tartalmazó maszk

Először olyan alapmintákat készítettem el, melyeket felhasználva és kombinálva később komplex maszkok lesznek készíthetők. Továbbá ezen mintázatok segítségével megvizsgálhatom a Galinstan viselkedését, megmérhetem a fém sebességét adott nyomásértékek esetén, és megvizsgálhatom a nedvesítési tulajdonságait. Ezen alapminták az egyenes csatorna, a fésűs elágazás, a meanderes csatorna és a Tesla-szelep. Szinte mindegyik fajtából terveztem különböző, 10, 20, 50, 100, 150 és 200 mikrométeres csatornaszélességűeket, azonban nem mindegyik került fel a végleges tervekre.

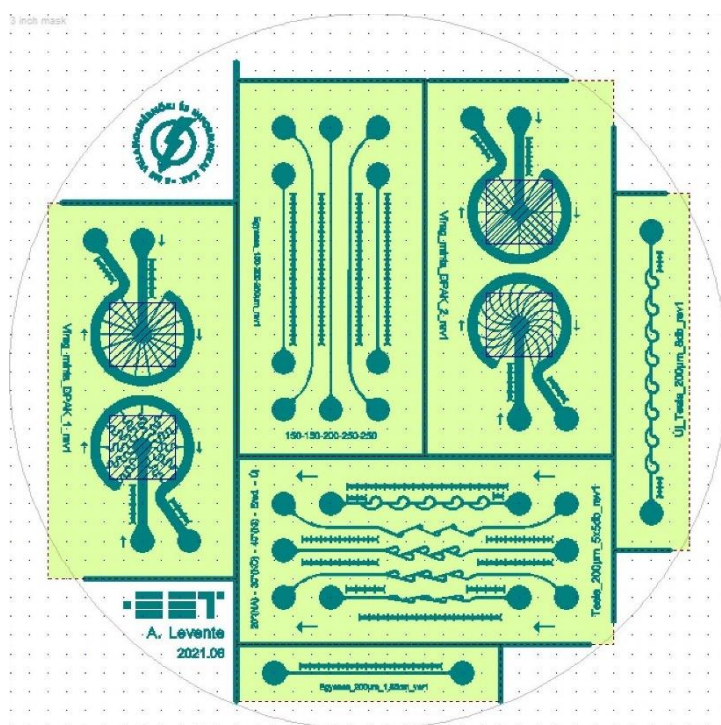


3.1.1. ábra: Az alapmintákat tartalmazó maszk

Az egyenes csatorna a legegyszerűbb minta, amely segítségével megmérhető a folyékony fém sebessége adott nyomásérték mellett. A fésűs elágazással nagy területet lehet hűteni, ugyanis 18 darab 25450 μm -es mikrocsonát tartalmaz. A meanderes csatorna alakzatot azért terveztem, mert segítségével hosszú csatornák készíthetők minimális helyigénnyel. A tervezett csatorna 15,8 mm hosszú. A Tesla-szelepek egy különleges tulajdonsága, hogy képesek mozgó alkatrészek nélkül folyadékokat egyenirányítani, így elérhető, hogy a folyékony fém csak egy irányba haladjon a térfogatváltozása során kialakuló nyomásváltozás eredményeképpen. A maszkon található 2,5 és 10 szelepes Tesla-szelep is. Egységesen minden csatorna 100 mikronos és a visszahajló ág 90°-os szöget zár be a főcsatornával [51]. A második maszkra terveztem más típusú Tesla-szelepeket is.

3.2 Virágmintás maszk

A maszkon négy fajta virágminta található: a sima egyenes, a meanderes, a lapátos és a fa struktúrájú. Mindegyik minta a DPAK tokozás méreteit figyelembe véve készült. A tesztelésük és szimulálásuk után egyértelműen kiderül majd, hogy melyik az optimális választás a négy közül egy DPAK tokozású alkatrész hűtésére. A virágmintákon kívül találhatók még egyenesek, melyek átmérőjét megnöveltem 150-200-250 mikronra. Ez azért volt szükséges, mert a korábbi, kisebb átmérők esetében rendkívül nagy nyomásesés jelentkezett a kezdetleges tesztelések során. A maszkon találhatók új Tesla-szelepek. Egy megtalálható a korábbi stílusból, azonban növeltem a csatornák átmérőjét 200 mikronra. Található még három új szelep, melyeknél változik a visszamenő ág főcsatornával bezárt szöge. Ezzel tesztelhető, hogy mi az ideális szög a két csatorna között. Végül terveztem egy teljesen új szelepet, ebből kettő is található a maszkon. Előnye lehet, hogy nem tartalmaz éles töréseket. A Tesla-szelepek a kutatás jövőjében játszhatnak majd nagy szerepet, hiszen a teljes rendszer megtervezésénél alkalmazni lehet őket egyenirányításra. Jelen esetben a fő hangsúly a virágmintákon van, ugyanis ezekkel fogok először termikus méréseket végezni.



3.2.1. ábra: A virágmintás maszk

4 Maszkok gyártásának folyamata

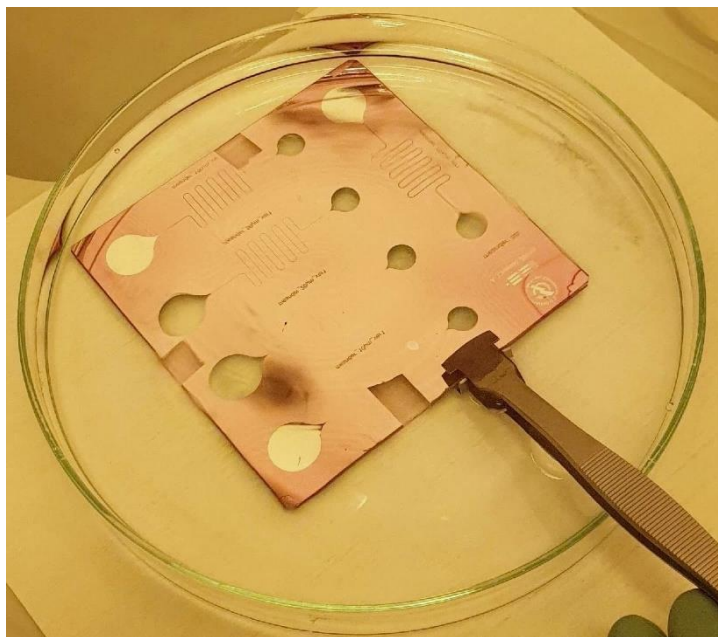
A maszkok fontos szerepet játszanak a tesztminták készítése során, ugyanis a később alkalmazott fotoreziszt ezeken keresztül kerül levilágításra. A maszkok elkészítése minden esetben hasonló módon történt, vagyis többnyire megegyező anyagokat és azonos technológiai lépéssort használva. A kiinduló anyag olyan üveglap volt, amelyre korábban alumínium vagy króm lett gőzölve. Első lépésben az üveglapot fel kellett melegíteni, hogy a rajta található vízmolekulák távozzanak a felületről. Ehhez a spin-coater berendezés hevítő tálcáját és a laboratóriumi hevítő berendezést használtuk. A szárítás 109–110 °C-on történt 5–10 percig, így biztosítva, hogy az összes vízmolekula elpárologjon a felszínről.

A hevítés után fényérzékeny fotoreziszt réteget kell felpörgetni az üveglap alumíniummal bevont oldalára. A használt fényérzékeny pozitív lakk fajtája MICROPOSIT S1813. A lakk piros színű, viszkózus folyadék. A felviteléhez a spin-coating eljárás ajánlott, mely lényege, hogy a nagy sebességgel forgatott üveglap közepére csepegtetett fotoreziszt a centrifugális erő miatt szétterül a felületen, ezzel egy vékony réteget képezve, míg a felesleg eltávozik a mintáról. Fontos, hogy a felcsepegtetéskor a folyadék ne érje el a széleket, ugyanis a felületi feszültség megváltozása miatt a folyadék abba az irányba kezd el gyorsulni erősebben, és így a lakk nem lesz egyenletes vastagságú. A spin-coater berendezésen beállításra kerültek a felpörgetés paraméterei. Először 7,5 másodpercig van ideje terülni a fotorezisztnek alacsony, 500 RPM-es fordulatszámmon, majd 4000 RPM-mel forog az üveglap 45 másodpercig, így egy vékony réteg jön létre.

A mintázat előhívásához a HEIDELBERG Instruments által gyártott DWL 66fs lézeres fotolitografáló berendezést használtuk. Az eszközt egy Windows operációs rendszerrel rendelkező gép kezeli, azonban a CIF-fájlok átalakításáért egy Linux operációs rendszeren futó gép felel. A lézeres gép kezelése meglehetősen bonyolult, valamint a teljes mintázat előhívása általában kicsit több, mint egy órába telik. A működésének alapja, hogy a rajzolandó mintát egy program apró szeletekre bontja, majd a lézer ezen szeleteket egyesével megrajzolja az üveglapon. Körülbelül 1000 szeletet készít a program, így a lézer 1000-szer halad el a minta felett.

Az előhívás után leoldható a lakk az előhívott helyeken, és lemartható a fém. A marószer először nem állt rendelkezésre, így az elsődleges cél csak a reziszt előhívása volt. Egy TMAH alapú oldószerrel feltöltésre került egy, az üveglapot tartalmazó Petri-csésze. Az oldószer lassú

ütemben elkezdte eltávolítani a lakkréteget az előhívott helyeken, majd nagy meglepetést okozott, hogy az alumíniumot is elkezdte marni. A TMAH alapú oldószer megátadja az alumíniumot és 50–100 nm/min sebességgel marják azt [52]. A procedura alatt végig mozgatni kell a mintát az oldószerben, hogy egyenletes maradjon a teljes felületen a marási és oldási sebesség. Körülbelül 10 percbe telik, míg teljesen lemaródik az összes fém.



4.1. ábra: A fém és a felesleges lakk leoldása

A képen egy korábban tervezett maszk látható a TMAH alapú fürdőben, amely később azonban nem lett felhasználva. A maszkon több hiba is megjelent néhol használhatatlanná téve az alakzatokat. Látható, hogy a minta közepén az alumínium már leoldásra került, míg a széleken még található fém. Ez a nem egyenletes lakk-eloszlás miatt van, az a széleken vastagabb maradt, így több időbe telt ott leoldani azt. Ez felvetette azt a problémát, hogy ahol hamar lemaródott a fém, ott a TMAH oldószer alámarhat a lakknak. A későbbiekben jobban ügyeltünk az egyenletes lakk-eloszlásra.

A marás befejezte után a maradék reziszt leoldása következett. Az előhívó gépbe helyezve az üveglapot, a lakk oldószerét használva eltávolítható a maradék lakk a felületről. A lépés befejezte után előáll a maszk, ami már használható a későbbi lépések során.

5 Maszkok mikroszkópos ellenőrzése

A maszkokat az elkészítés után megvizsgáltam mikroszkóp alatt, valamint képeket is készítettem. A mikroszkópos vizsgálat fontos lépés, ugyanis szabad szemmel nem biztos, hogy észrevehetőek a mikronos nagyságrendű hibák, amelyek később befolyásolhatják a tesztminták minőségét. Szükség esetén a gyártási folyamat megismételhető a lépések paramétereinek finomhangolása után. Az alábbi képeken az alampintákat tartalmazó maszk mikroszkópos felvételei láthatók.



5.1. ábra: Két Tesla-szelep mikroszkóp alatt



5.2. ábra: A meanderes csatorna mikroszkóp alatt

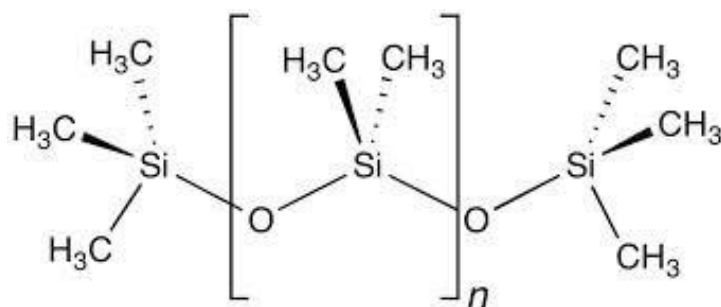
Látható, hogy a maszkok meglehetősen jól sikerültek, kevés hiba keletkezett a gyártás során. Apróbb szennyeződések megjelentek, azonban ezek nem kritikus helyeken, hanem üres részekben alakultak ki. A csatornák fala megfelelő lett, nem látható töredezés vagy leválás. Az elkészített maszkok nagy része is azonos minőségű lett. Összességében elmondható, hogy jó minőségűek lettek az alakzatok, az előhívás lehetséges lesz a maszkok segítségével a későbbi lépések során.

6 Csatornák gyártásához felhasznált anyagok

A mikrocsatornák kialakításához korábban főleg szilíciumot és üveget alkalmaztak, ezen anyagokon kerültek létrehozásra az alakzatok az anyagok robosztus felületi stabilitásának, valamint a már kiforrott gyártási technológiáknak köszönhetően. Ilyen technológiák a fotolitográfia és a kémiai marás, melyek eredetileg a MEMS területre lettek kifejlesztve. A magas gyártási költségek, speciális eszközök szükségessége és a hosszú feldolgozási idő azonban problémákat okoztak, így szükségessé vált egy olyan alternatívát keresni, ami megoldja a felsorolt problémákat. A dimetil-polisziloxán egy megfelelő helyettesítő szubsztrátnak bizonyult a prototípusok esetében. Az anyag biokompatibilis, valamint elasztikus tulajdonságokkal rendelkezik, amely lehetővé teszi az anyag által létrehozott formák és mintázatok finomhangolását [53].

6.1 Dimetil-polisziloxán (PDMS)

A dimetil-polisziloxán, rövidítve PDMS, egy szilícium alapú szerves polimer, ami a sziloxán csoportba tartozik. Struktúrája szén, hidrogént és oxigént is tartalmaz, neve is ezen anyagok neveiből származik (Silicon-Oxygen). A PDMS empirikus formulája: C_2H_6OSi .



6.1.1. ábra A dimetil-polisziloxán struktúrája

A PDMS fragmentált formulája: $CH_3[Si(CH_3)_2O]_nSi(CH_3)_3$, ahol n a monomerek ismétlődését adja meg. A monomer lánc méretétől függően változik az anyag viszkozitása. Amennyiben n kicsi szám, úgy közel folyadéknak tekinthető. Nagy n esetén közel szilárd halmazállapotú anyag. Az anyag különleges tulajdonsága, hogy viszkoelasztikus, vagyis hosszan tartó erőhatás esetén folyadékként viselkedik, azonban gyors erőhatás esetén rugalmas módon reagál, vagyis a gumihoz hasonló tulajdonságokat vesz fel. Kémiaiilag rendkívül stabil anyag, ugyanis alig reakcióképes, nem mérgező és nem is gyúlékony. Felhasználása széleskörű, élelmiszeriparban például élelmiszer-adalékanyag, de samponokban és síkosító olajokban is

megtalálható. Az anyagot lágy litográfiás eljárások során is alkalmazzák jó alaktartásából kifolyólag. MEMS rendszerekben mikro- és nanofluidikai rendszerek alapanyaga, valamint a PDMS anyagban lenyomatos litográfiával mikrocatornák is kialakíthatók [54]. Jelen kutatás során az anyagot a lenyomatos litográfiai módszerrel fogjuk formázni, ezzel az eljárással hozunk benne létre mikrocatornákat. Az említett eljárás lényege, hogy a létrehozandó minták inverze egy fényérzékeny lakkon, jelen esetben az SU-8 fotorezisztten kerül megvalósításra, ami a PDMS öntőformájaként fog funkcionálni. Ezen az elválasztás után létrejönnek a tervezett minták lenyomatai.

6.2 SU-8 fotoreziszt

Az SU-8 anyag egy negatív, epoxi alapú, UV tartomány közeli fényre térhálósodó fotoreziszt, amit az IBM fejlesztett és védetett le 1989-ben. A fotoreziszt vastagsága a 2 mm-t is elérheti és az oldalarány száma 20-nál is nagyobb lehet. Az anyag többnyire jól tapad más anyagokhoz, azonban az aranyhoz nem. A tapadása szilícium esetében normálisnak tekinthető, legjobban a szilícium-nitridhez tapad. Az anyag biokompatibilis, az elektrofiziológia területén is kísérleteznek vele. Az anyag megszilárdulása után nem lehetséges újra folyékony halmazállapotúra változtatni [55]. A használt lépéssorozat SU-8 előhívása esetén, közelítő értékekkel:

1. Spin-coating
2. Lágy sütés – 65 °C, 5 perc, majd 90°C, 15 perc
3. Relaxációs idő – 10 perc
4. Levilágítás – 16,67 másodperc az egyetemi laborban található levilágítóval
5. Sütés – 65 °C, 5 perc, majd 90°C, 15 perc
6. Relaxációs idő – 10 perc
7. Előhívás – PGMEA (propilén-glikol-metil-éter-acetát) 5 perc, izopropil-alkohol

Az SU-8 anyag felvitele a spin-coating technológiával történik. A fotoreziszt vastagágát a forgatási sebesség, gyorsulás és az SU-8 viszkozitása fogja meghatározni. Laboratóriumi körülmények között a spin-coating használata meglehetősen gazdaságtalan. A forgatás során az SU-8 95%-a is kárba vesztet, azonban a folyamat könnyen kivitelezhető és ismételhető [55].

7 Tesztminták legyártása

A korábban tervezett és legyártott maszkok segítségével el lehet kezdeni elkészíteni az alakzatokat a PDMS anyagban. Az első lépés a PDMS alap elkészítése.

7.1 PDMS alap létrehozása

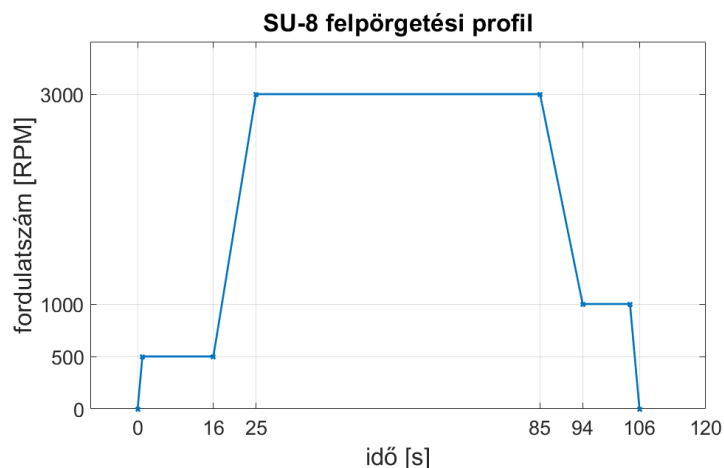
A PDMS két viszkózus folyadékból lett kikeverve, melyek a SYLGARD 184 Silicone Elastomer Base (*A* összetevő) és a SYLGARD 184 Silicone Elastomer Curing Agent (*B* összetevő), vagyis az alaptól és az azt megszilárdító összetevőből. 10:1-hez keverési arányt alkalmaztunk, az *A*-ból 30 g-ot, a *B*-ből 3 g-ot használtunk fel.

A kikevert PDMS 4 Petri-csészébe került kiöntésre mindegyikben egy vékony réteget létrehozva. Vákuumkamra segítségével buborékmentesítésre került a PDMS, majd az anyag megszilárdulása után elkészül a PDMS-réteg. Ez adja majd az alapját a szilícium lapkáknak melyen SU-8 segítségével létrehozásra kerülnek a minták. Ezen lépés azért szükséges, mert a szilícium így nem a Petri-csészék alján fog elhelyezkedni, hanem egy puha PDMS-rétegen, ami megfelelő tapadást biztosít neki.

7.2 Minták létrehozása SU-8-on

Az alakzatok szubsztrátját 3 inch-es szilícium lapok adták, amelyek alaposan letisztításra kerültek használat előtt H_2SO_4 és H_2O_2 , 3:1 arányú keverék segítségével. Ezután vízzel lemosásra kerültek a lapkák, majd spin-dry eljárást alkalmazva azokról eltávozott a víz nagy része. Az SU-8 felpörgetése előtt a lapkákat fel kell hevíteni, hogy minden vízmolekula eltávozzon a felületről. A felpörgetéshez az SU-8 2100-as anyag került felhasználásra, melyet korábban melegvizes fürdőbe helyeztünk, hogy kisebb viszkozitása legyen.

Az SU-8 felpörgetése a lapkákra a spin-coater segítségével történt. Az SU-8 ráöntése a lapkára egy 15 másodperces 500 RPM-es részen történt. Körkörösen kell felpörgetni, a lehető legnagyobb területet lefedve, hogy ezáltal egyenletes legyen a felszín a folyamat végére. Ezután egy 3000 RPM-es szakasz következik 60 másodpercig, ami alatt elterül az SU-8. A végén egy 1000 RPM-es szakasz jön 10 másodpercig, alatta el lehet távolítani az SU-8 peremét az oldószerét ráöntve. A különböző fordulatszámok közötti váltáshoz időre van szüksége a spin-coater berendezésnek, így a szakaszok között pár másodpercet hagyni kell.



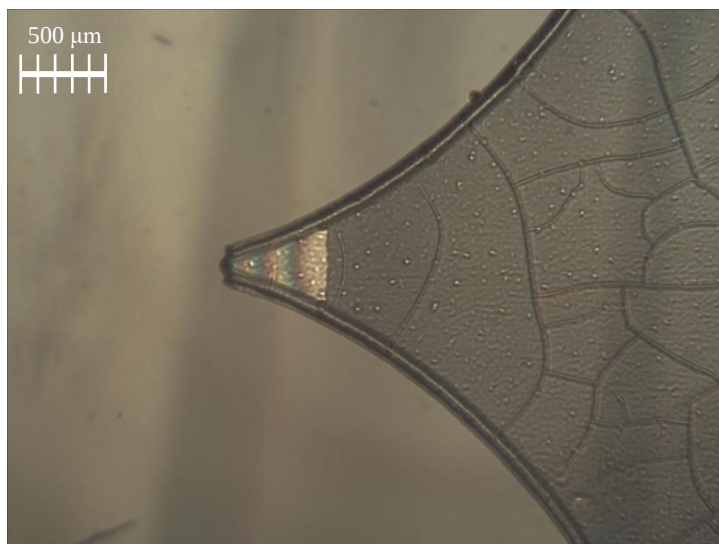
7.2.1. ábra: Az SU-8 felpörgetéséhez használt profil

A pörgetés után hőkezelní kell magas hőmérsékleten az SU-8-at, így az ellenállóbb lesz, valamint nem tapad hozzá a maszk. A hőkezelés 65 °C-on történt 5 percig, majd egy 90 °C-os szakasz követte 15 percig. A hőkezelés végeztével a maszkillesztőbe helyezve levilágításra kerül az SU-8, így kialakulnak a mintázatok az anyagon. A levilágítás ideje 16,67 másodperc.

Az exponálás után a post-bake következik, vagyis újra hőkezelní kell. A hőkezelés azonos paraméterekkel történik, mint korábban. A lépés végeztével le lehet oldani a maradék SU-8-at. Ehhez a fotoreziszt oldószere és acetón került felhasználásra. A leoldás végeztével előállt a mintázat, amelyet izopropil-alkohollal lehet fixálni.

7.3 SU-8 mintázat mikroszkópos vizsgálata

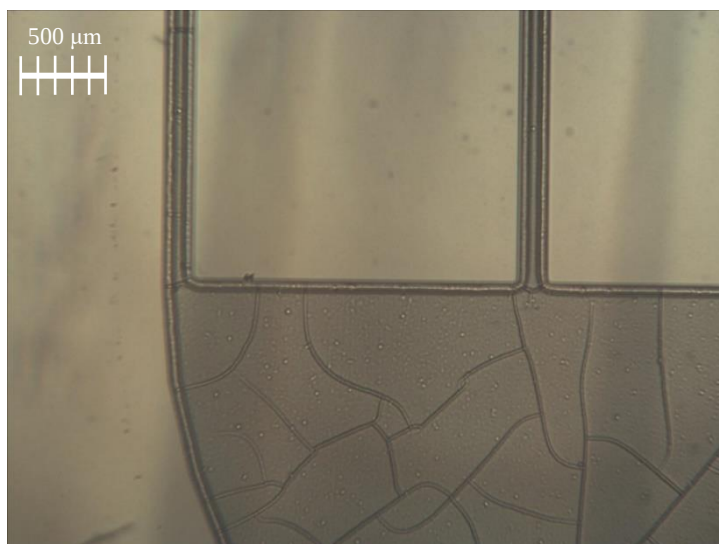
Bár a legtöbb mintázat jó minőségű lett, előfordult, hogy elvált az SU-8 a szilícium laptól, valamint néhol le is szakadt. Ez feltehetőleg a nem megfelelő előhívás vagy nem megfelelő tapadás miatt történhetett.



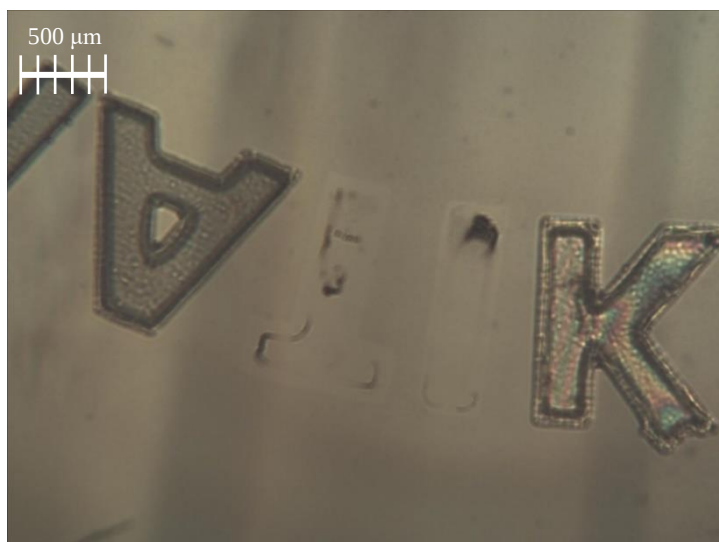
7.3.1. ábra: Levált csatorna csatlakozója



7.3.2. ábra: Hiányos csatorna



7.3.3. ábra: Töredezett SU-8

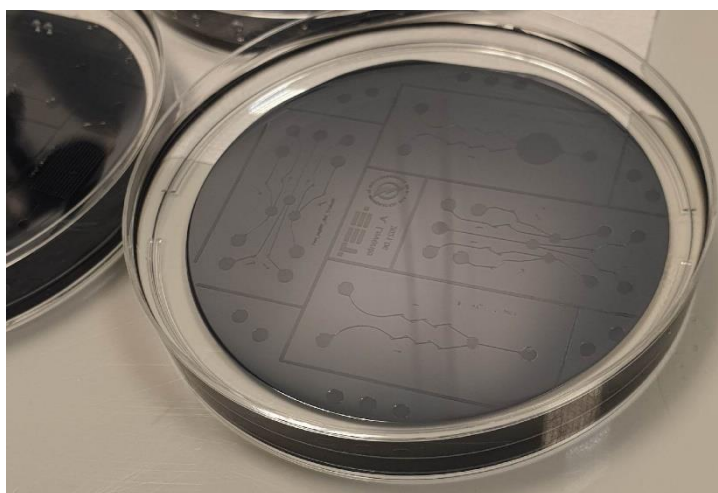


7.3.4. ábra: Levált betűk

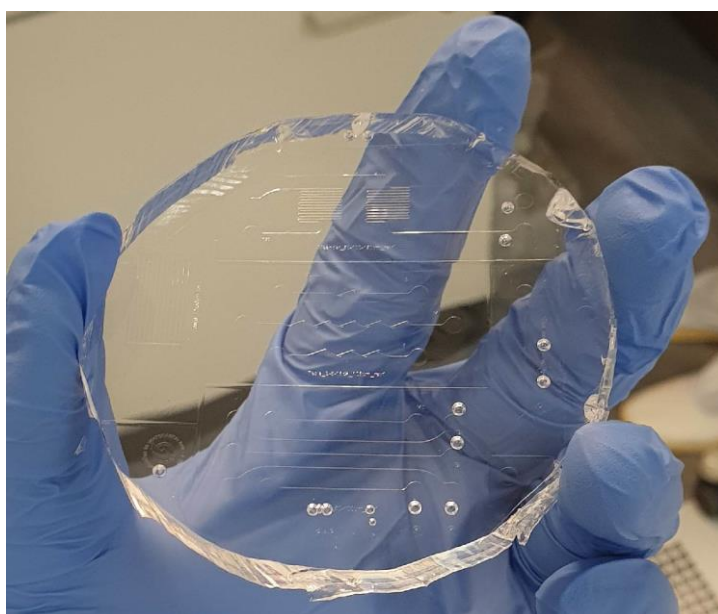
Gyakran berepedeztek az alakzatok, ami valószínűleg a sütési lépések miatt történt. A végeredményt nem befolyásolja jelentősen nagy alakzatok esetén, azonban gyengíti az SU-8 struktúráját. Többek között ilyen repedések mentén váltak le kisebb csatornák, alakzatok. Előfordult, hogy a mintázat levált a lapkáról, viszont nem szakadt le. A legkisebb meanderekből (20 mikron) az összes levált, feltehetően a kicsi tapadási felület miatt. A betűk esetében történt olyan is, hogy azok teljesen leváltak a szilíciumról. Ez nem befolyásolja a végeredményt, azonban a leszakadt, levált darabokat el kell távolítani a felszínről, ugyanis a PDMS-sel való kiöntés során gondot okozhatnak.

7.4 SU-8 mold kiöntése PDMS-sel

Az SU-8 mintát a PDMS alapra mintázattal felfelé helyezve, ki lehet önteni PDMS-sel. A korábbival azonos arányokat használva kikeverésre került a PDMS, majd kiöntöttük a Petri-csészéket. A buborékok vákuum segítségével eltávolíthatók az anyagból. A PDMS megszilárdulásához szükséges idő szobahőmérsékleten legalább 1–2 nap. A megszilárdulást követően ki lehet vágni a csészeből, majd a szilícium lapkát elválasztva előállnak a mintázatok, melyeket a következő lépésben rögzíteni kell egy szubsztráthoz.



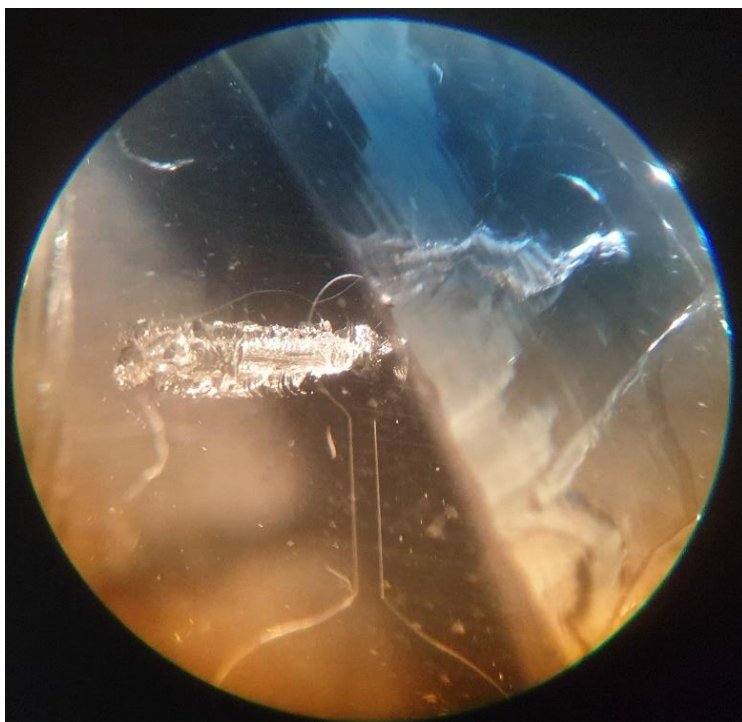
7.4.1. ábra: Megszilárdult PDMS, benne az SU-8 öntőformával



7.4.2. ábra: Kivágott PDMS, alján a negatív mintázattal

7.5 PDMS kiszúrása és rögzítése üveghez

Ahhoz, hogy folyadék tudjon áramolni a mintában, szükséges lyukat fúrni a PDMS-be. Ez többféle módon is lehetséges, jelen kutatás során a PDMS egy tű segítségével került kiszúrásra.



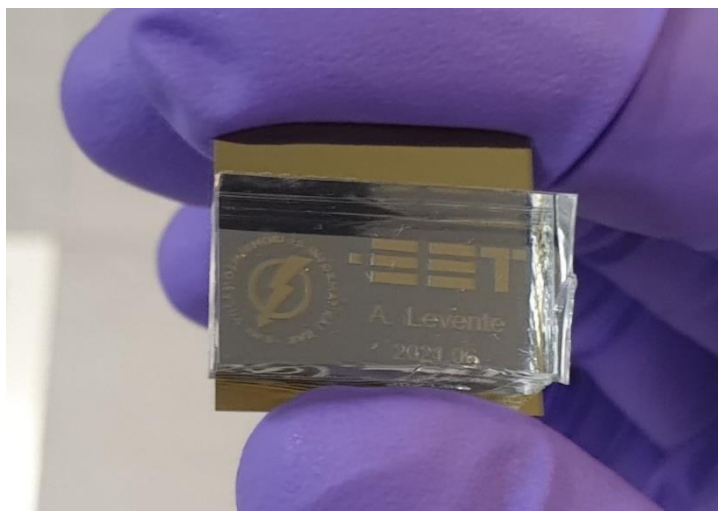
7.5.1. ábra: Tűvel szúrt lyuk a PDMS-ben

A fenti képeken látszik, hogy az átszúrás jelentősen roncsolta a PDMS-t, ezzel gyengítve a lyuk struktúráját. Ez abból a szempontból probléma, hogy a tesztelés során szivárgásokhoz és a PDMS szétrepedéséhez vezethet. A lyukak kiszúrását követően lehet rögzíteni a PDMS-t. A rögzítéshez először tárgylemezt használtunk, ami üvegből van. Az összeillesztés előtt az üveglapot és a PDMS-mintát is egyaránt plazmázni kell oxigén közegben. Ezzel az üveg felülete megtisztul a szennyeződésektől, a PDMS felületén pedig szabad gyökök keletkeznek, melyek képesek tapadni az üveghez. A plazmázás az üveg és a PDMS esetében is csak pár percet vesz igénybe. Kivétel után sietve kell összeilleszteni őket, hogy ne koszolódjanak be a felületek. Öszeillesztés után hőkezelní kell az eszközt. 20 percig 90 °C-on tartva a mintát, véglegesen összetapad a két anyag, és erős kötés jön létre közöttük. Ezen lépés után előállnak a minták, melyeket már lehet tesztelni a mintatartóval.

7.6 Üveg kicserélése szilícium hordozóra

Annak ellenére, hogy az üveg megfelelőnek bizonyult a kezdetleges kísérletek esetében, az a termikus tesztek során nem lesz használva. Ennek oka, hogy különböző félvezető eszközöket szeretnénk hűteni a Galinstannal. Az üveg rosszul vezeti a hőt, így meghamisítaná a teszteredményeket. A szilícium rendkívül jó hővezető, valamint meglehetősen vékony is, így az a mérési eredményeket nem fogja eltorzítani.

A szilícium és a PDMS összeillesztése ugyanazon elv alapján működik, mint az üvegé és a PDMS-é. A szilíciumon egy védő-oxidréteg található, mely viselkedése az üveggel közel megegyező. Az összeillesztés előtt szükséges plazmázni a felületeket, majd összetapadás után magas hőmérsékleten kell kezelni a mintákat.



7.6.1. ábra: A PDMS és szilícium összetapasztva

A képen az első tesztminta látható, amely lefejtési vizsgálatokhoz készült. Mivel a PDMS rendkívül erősen összetapadt a szilíciummal, azt nem sikerült kézzel lefejteni. Az erő hatására a PDMS elszakadt, azonban a mintáról nem vált le. Ez az erős tapadás a későbbiekben is fontos szerepet fog játszani, ugyanis ez fogja biztosítani, hogy nagy nyomás esetén se repedjen szét a tesztminta.

8 Galinstan kikeverése

Először kiszámoltam az 1 cm³ Galinstanhoz szükséges fémek tömegét. 1 cm³ Galinstan tömege 6,44 g, a fém összetétele százalékosan pedig 68,5% gallium, 21,5% indium, és 10,0% ón [28]. A laborban kimértük a szükséges mennyiségeket, elsőnek az indium lett kiválasztva. A korábban számított 1,3846 g helyett 1,3843 g került kimérésre. A fém acélszikkével könnyen vágható volt, könnyen kezelhető anyag. Az anyag kis golyók formájában lett megvásárolva. Ezután az ón következett, amely cseppek formájában volt elérhető. Ezen anyag esetében a számított 0,6440 g helyett 0,6605 g-ot sikerült kimérni. A fém könnyen kezelhető, könnyen vágható volt. Végül a gallium került kimérésre. A számolt 4,4114 g helyett 4,4115 g-ot sikerült felhasználni. A gallium korábban hűtőben volt tárolva, hogy ne olvadjon meg, emiatt a vágás során nehézség adódott, ugyanis az anyagot nem lehetett könnyen szeletelni, rendkívül rideg volt. A megoldást kisebb darabok lekaparása jelentette. Ezt követően a kimért fémeket egy üvegbe helyezve, majd azt alulról melegítve a fémek összeolvadtak. Ezzel sikeresen előállt a Galinstan folyékony fém.

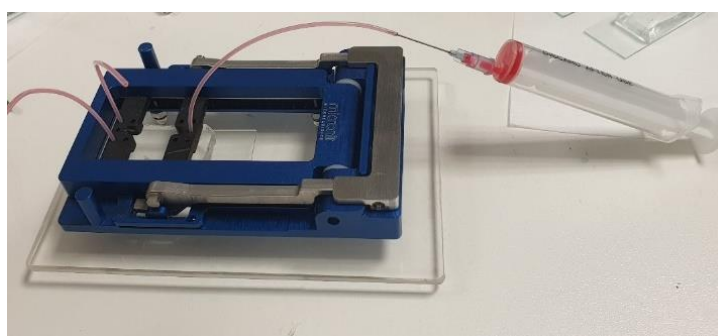


8.1./8.2. ábra: A fémek olvasztás előtt és után

A fenti ábrákon az olvasztás előtti és utáni állapot látható. A kimért mennyiségek alapján a tömeg 6,4563 g, azonban látható, hogy megtapad a fém az üvegen, így a valóban felhasználható mennyiség kevesebb.

9 Micronit mintatartó használata és tesztelése

Micronit FC_PRO_CH mintatartót használtunk a mintázatok teszteléséhez, ami speciálisan mikrofluidikai kísérletekhez tervezett befogó eszköz. A mintatartó alapja plexire lett cserélve, így biztosítva, hogy alulról is láthatók legyenek a minták üveg szubsztrát esetén. Probléma adódott azonban az alap és a mintatartó közötti távolsággal. A PDMS minták túl vastagnak bizonyultak. Ezt hosszabb csavarokkal és távtartókkal lehetett orvosolni. A beállítás után teszteltük a mintatartót és egy mintát színes folyadékkal.

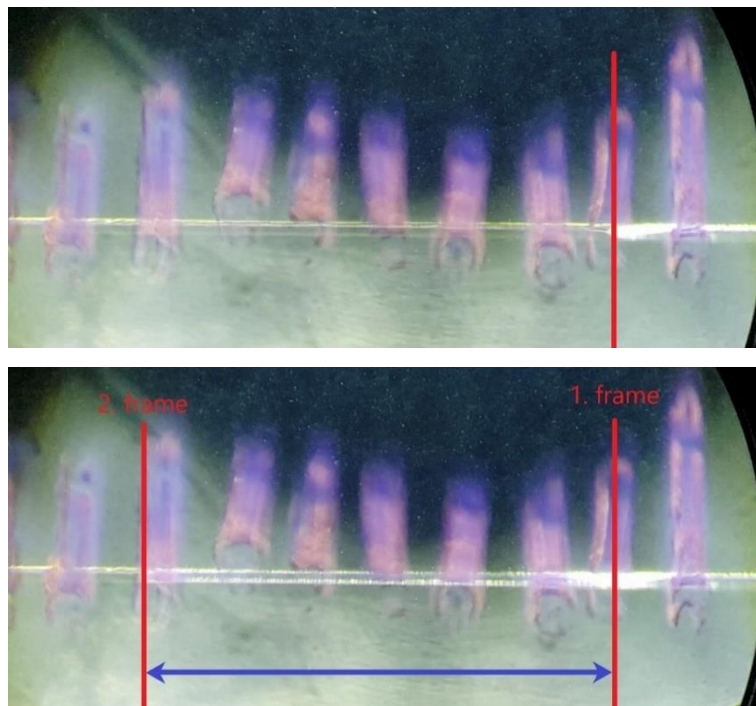


9.1. ábra: A Micronit mintatartó tesztelése

A teszt sikeresen zárult, az inletek és outletek csatlakozásai a roncsolt lyukak ellenére tökéletesen zártak, nem szivárogtak. A folyadék színe nem volt szemmel látható a mikrocsatornában, feltehetően az alacsony pigmentkoncentrációnak köszönhetően. A PDMS átszúrása nagy körültekintést igényel, mert már kis hiba esetén is a tömítőgyűrű alá kerülhet a kiszúrt lyuk. Ez eredményezhette, hogy bizonyos esetekben nagyobb nyomásra volt szükség a folyadék áthajtásához a csatornában. Megemlítendő, hogy esetenként a csatornák eltömődése is közrejátszhatott abban, hogy nagyobb nyomásra volt szükség. Egyes minták tesztelésekor a csatornákon egyáltalán nem sikerült folyadékot átpréselni. A későbbiekben nagyobb odafigyeléssel készítettük a mintákat. A termikus mérés elvégzéséhez egy DPAK tokozású teljesítmény-tranzisztort használunk, amit stabilan rögzíteni kell, hogy a lehető legpontosabb mérési eredményeket kapjunk. Ehhez egy 4 mm-es teflon lapból vágunk ki egy téglalapot, ami a mintatartó és az akrillap között fog elhelyezkedni. A teflonból 2,3 mm-t ki kellett marni a szükséges helyeken, hogy a tranzisztort és a vezetékeztést be lehessen süllyeszteni a minta alá.

10 Galinstan sebességének mérése

A maszkokra nem terveztem vonalzókat a kutatás elején, így rögtönözve rajzoltunk tollal a PDMS tetejére milliméteres osztásokat. A sebesség megmérésére azért volt szükség, hogy szimulációval lehessen vizsgálni a különböző alakzatokat. A mérés egy videó alapján történt. A mikrocsatornán Galinstan áramlott, miközben az videóra lett véve, majd a videó képkockasebessége és a távolság alapján visszaszámoltam a folyékony fém sebességét. Mivel meglehetősen pontatlan a vonalzó, így a sebességre csak egy jó közelítés kapható. Ez azonban már elég ahhoz, hogy szimulálni lehessen a mintákat. A későbbiekben már terveztem vonalzót a mintázatok mellé.



10.1./10.2. ábra: A számoláshoz használt képek a videóból

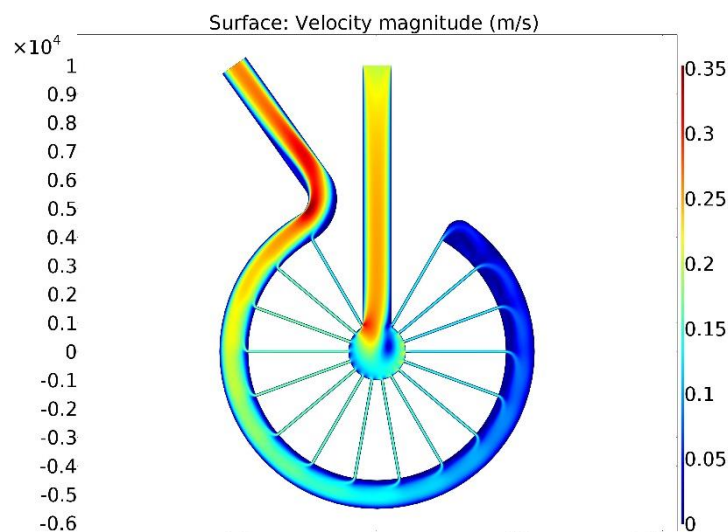
Két képkocka alapján tudtam számolni a Galinstan sebességét a csatornában. A becslésem szerint a távolság 6,5 mm, a két képkocka közötti idő 0,0348427 s, mivel a képkockasebesség 28,700342 fps. Ezen adatok alapján a folyékony fém sebessége 0,186552 m/s. A tesztelt csatorna 1,65 cm hosszú és 150 mikron széles.

11 Minták hidrodinamikai szimulációja

A minták működését érdemes megvizsgálni szimulációval is, hogy lehessen ellenőrizni a működésüket. A szimulációkkal három mintázatot fogok megvizsgálni, a sima egyenes, a lapátos és a meanderes virágmintát. A fa struktúrájú virágmintát nem sikerült legyártani hiba nélkül a túl kis átmérőjű csatornák miatt, így az tesztelve sem lesz. A szimulációk elkészítéséhez a COMSOL nevű programot használtam. A CleWin programban beállítható, hogy ne CIF-kiterjesztésben mentse el az alakzatokat, hanem DXF-ben. Ezt a kiterjesztést tudja kezelni a COMSOL, és ezáltal importálhatók lesznek a mintázatok. Ezzel sok időt tudtam spórolni, mivel nem kellett újra megtervezni őket. A szimulációk során a teljes alakzatokat teszteltem. Minden minta esetén elkészítettem a szimulációt Galinstannal. A hálót minden esetben extra finomra állítottam, a folyadékok sebessége 0,2 m/s az inleten. A szimulációhoz turbulens áramlást használtam, melynek típusa: Algebraic yPlus (spf). A nyomások számításakor abszolút nyomásmérést alkalmaztam, ekként az atmoszferikus nyomás is része az értékeknek. A relatív nyomások számításakor, mint például a nyomásesés, ez kiesik a végeredményből.

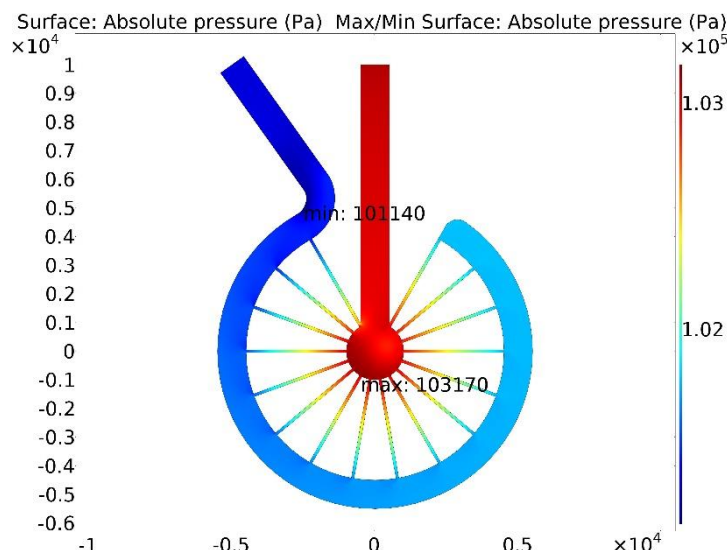
11.1 Sima egyenes virágminta szimulációja

Ez a virágminta a legegyszerűbb az összes közül, csak egyenes csatornákat tartalmaz a bemenő és kimenő csatornák között. A szimuláció eredményeiből először a sebességeloszlást vizsgáltam meg.



11.1.1. ábra: A sima egyenes virágmintában a folyadék sebességeloszlása

A sebesség minimuma 0 m/s-ra, a maximuma 0,352 m/s-ra adódott. A Galinstan felgyorsul a kivezető kanyarban, majdnem másfélszeres sebességre a beáramlási sebességéhez képest. Ez a folyadékra ható nyomás miatt történhet. A mintázat tartalmaz olyan részeket, amelyekben egyáltalán nem áramlik Galinstan. Ez természetesen megkérdőjelezhető, hiszen a szimuláció nem veszi figyelembe a Galinstan nedvesítési képességét. A sebességeloszlás vizsgálata után elemeztem a nyomáseloszlást és nyomásesést is.



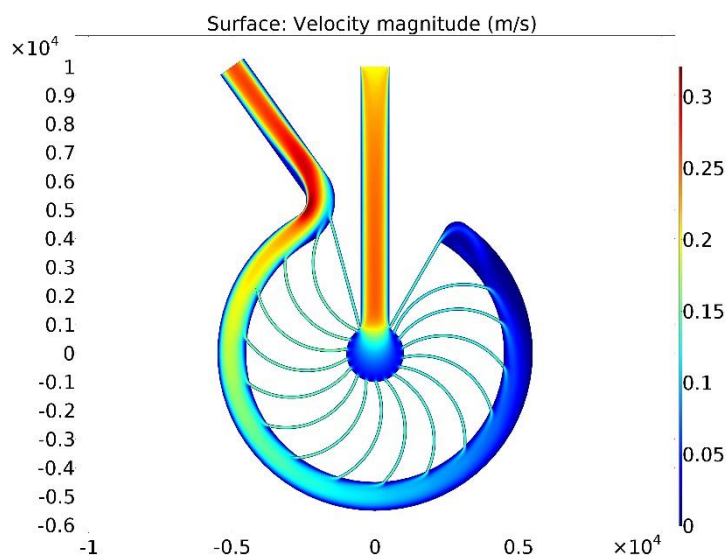
11.1.2. ábra: A sima egyenes virágmintában a folyadék nyomáseloszlása

Látható, hogy a nyomás főleg a mikrocatornáknak esik sokat, a bevezetésen és kivezetésen szinte alig csökken. A maximális nyomásérték 103170 Pa, a minimális érték 101140 Pa. A két érték között a különbség 2030 Pa. Látható, hogy a minta különböző pontjain eltérő nyomásértékek vannak, melyek megterhelhetik a PDMS anyagból készült szerkezetet. A nyomásesés számolásához szükség van az inlet és outlet nyomására. Az inleten mért átlagos nyomás a szimuláció alapján 103080 Pa, az outleten mért nyomás 101320 Pa, a teljes nyomásesés a kimenet és bemenet között így 1760 Pa-ra adódik. Ezen értéket és a sebességeloszlást a későbbiekben összehasonlítom a többi mintázat esetén számolt értékekkel, így egy jó képet kaphatunk a minták hidrodinamikai tulajdonságairól.

11.2 Lapátos virágminta szimulációja

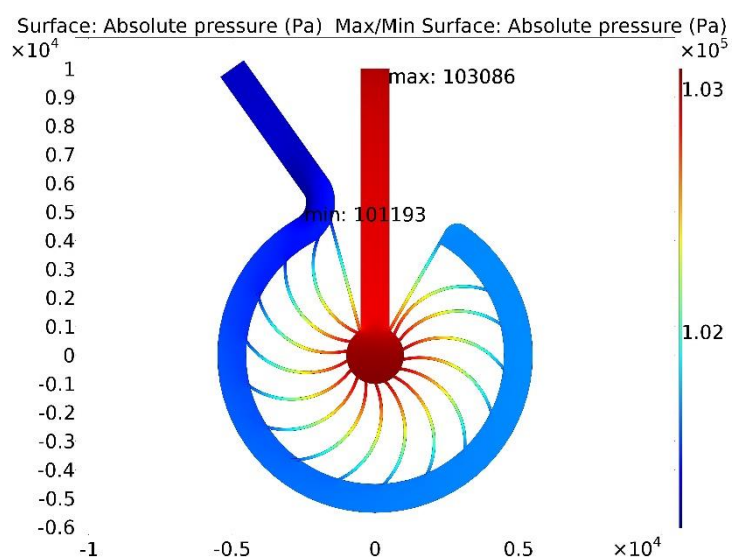
Ez a mintázat annyiban különbözik a korábban bemutatott virágmintától, hogy két esetet leszámítva nem egyenes csatornákat tartalmaz, hanem hajlítottakat. A motiváció a minta elkészítésére az volt, hogy az alakzattal a gyűjtőcsatornában elkerülhető a folyadék áramlási

irányára merőleges beömlés, mivel a hajlított csatornák vége az outlet irányába mutat. Feltételeztem, hogy emiatt egyenletesebb lesz a nyomás- és a sebességeloszlás egyaránt.



11.2.1. ábra: A lapátos virágmintában a folyadék sebességeloszlása

A szimuláció lefuttatása után egyből láthatóvá vált, hogy a sebességeloszlás sokkal egyenletesebb ezen alakzatnál, mint az egyenes-csatornás alakzat esetében. A mikrocsonák kiindulási tartálya esetében fokozatosan és szimmetrikusan változik a folyadék sebessége, nem úgy, mint az előző esetben, ahol a folyékony fém felgyorsult az outlethez közelebbi mikrocsonák körül lévő részen. Ezután a nyomáseloszlást is szimuláltam.

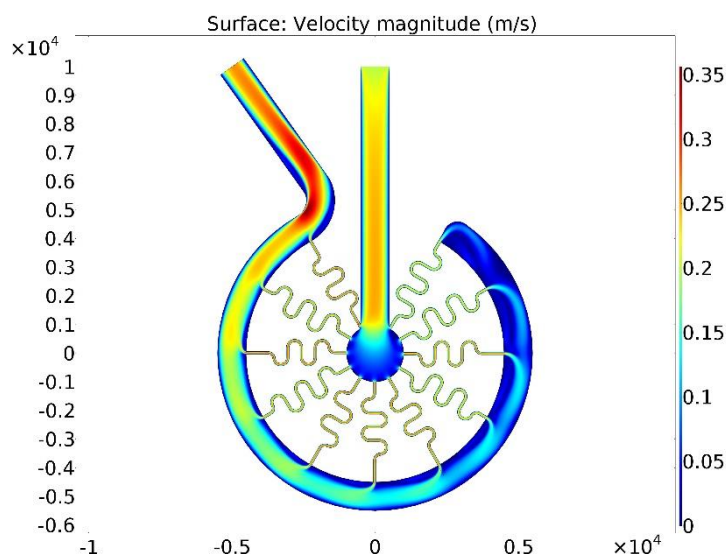


11.2.2. ábra: A lapátos virágmintában a folyadék nyomáseloszlása

A maximális nyomásérték ezen mintázat esetében 103086 Pa, a minimális érték 101193 Pa, a két érték között a különbség 1893 Pa. Az előző mintázathoz képest ez az érték 137 Pascallal kevesebb. Ez bizakodásra adhat okot, ugyanis ez azt jelenti, hogy a mintázat kisebb csatornaellenállással rendelkezik, mint az első mintázat. Az inleten mért átlagos nyomás a szimuláció alapján 103000 Pa, az outleten mért nyomás 101330 Pa, a teljes nyomásesés a kimenet és bemenet között így 1670 Pa-ra adódik. Ez 90 Pascallal kevesebb, mint az előzőleg mért nyomásesés. Ezen értékek alapján belátható, hogy a lapátos mintázat kedvezőbb hidrodinamikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint az egyenes-csatornás alakzat. A termikus-tranziens tesztelés során ki fog derülni, hogy ez a mintázat valóban alkalmasabb-e a DPAK tokozású tranzisztor hűtésére.

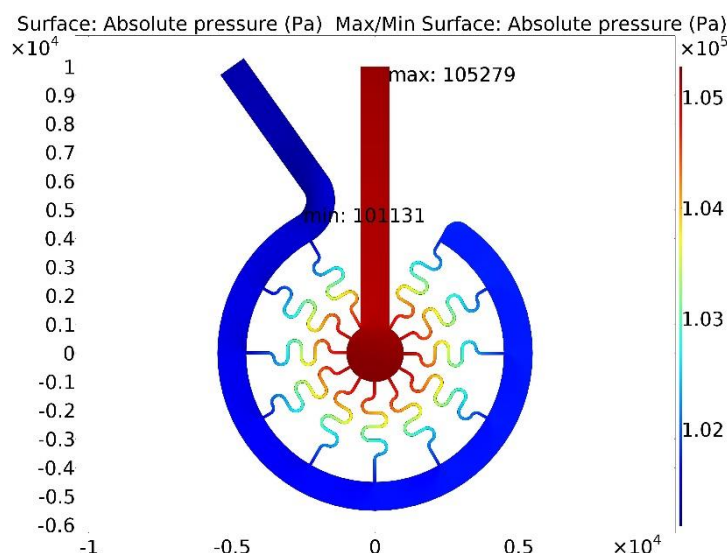
11.3 Meanderes virágminta szimulációja

A meanderes mintázat nagyobb effektív hűtési területtel rendelkezik, mint az előző két bemutatott mintázat, azonban feltehetőleg rosszabbak a hidrodinamikai tulajdonságai.



11.3.1. ábra: A meanderes virágmintában a folyadék sebességeloszlása

A sebességeloszlás hasonlít a lapátos minta esetében látott eloszlásra, a középső tartályban folyamatos átmenettel csökken a fém sebessége. Látványos jelenség, hogy a meanderekből kilépő folyadék nagyobb sebességű, mint a korábbi szimulációk során, valamint az jelentősebben a gyűjtőcsatorna külső fala felé gyorsul. Ez valószínűleg nagyobb nyomásesést eredményez.



11.3.2. ábra: A meanderes virágmintában a folyadék nyomáseloszlása

A maximális nyomásérték ezen mintázat esetében 105279 Pa, a minimális érték 101131 Pa, a két érték között a különbség 4148 Pa. Ez az eddig mért legnagyobb érték, vagyis meglehetősen nagy a csatornaellenállás a mintázat esetében. Az inleten mért átlagos nyomás a szimuláció alapján 105190 Pa, az outleten mért nyomás 101320 Pa, a teljes nyomásesés a kimenet és bemenet között így 3870 Pa-ra adódik. A feltételezés helyesnek vélhető, ugyanis valóban ez a mintázat rendelkezik a legnagyobb ellenállással, hiszen a legnagyobb nyomásesés itt volt mérhető. A meanderek miatt hosszabbak a mikrocsatornák, és mivel nem egyenesek, ez plusz csatornaellenállásként jelentkezik a végeredményben.

11.4 Mintázatok összehasonlítása

A mintákat összehasonlítva kirajzolódhat, hogy melyik lesz a legalkalmasabb jelölt a hűtési feladatok ellátására. Ez azonban a termikus mérések során változhat, hiszen a szimuláció nem, vagy csak részlegesen veszi figyelembe a való életben található tényezőket, amelyek erősen befolyásolhatják a végeredményeket. Ilyen például a folyamatosan kialakuló felületi oxidréteg, vagy a PDMS rugalmas alakváltozása. Ezen faktorokat leszámítva a szimulációs eredmények fontosak lehetnek a kutatás jövőjének szempontjából, hiszen így jobban behatárolható, hogy melyik mintával érdemes a későbbiekben is foglalkozni, esetleg azt továbbfejleszteni. A legjobb hidrodinamikai tulajdonságokkal rendelkező mintázathoz lesz szükség a legkevesebb nyomásra a folyadék áramoltatásához, amely fontos szempont lesz a tervezendő hűtőrendszer esetén.

	Sima egyenes virágminta	Lapátos virágminta	Meanderes virágminta
Max. nyomás	103170 Pa	103086 Pa	105279 Pa
Min. nyomás	101140 Pa	101193 Pa	101131 Pa
Különbség	2030 Pa	1893 Pa	4148 Pa
Teljes nyomásesés	1760 Pa	1670 Pa	3870 Pa

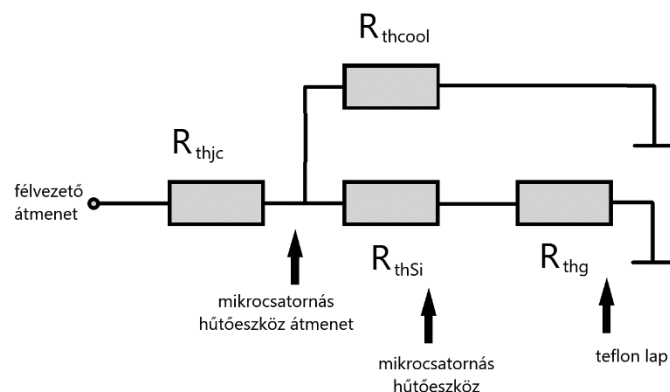
11.4.1. táblázat: A szimulációs eredmények összehasonlítása

A legnagyobb nyomásesés és nyomáskülönbség is a meanderes minta esetén lép fel. Bár ez fedi le a hűtendő terület legnagyobb részét, a felhasználás során gondot okozhat a nagy nyomásesés. A lapátos virágminta a sima egyenes virágmintánál minimálisan hosszabb mikrocatornákat tartalmaz, azonban ezek a csatornák az outlet felé irányítják a folyadékot, így az áramlás kisebb ellenállásba ütközik. A szimulációk alapján a lapátos virágminta rendelkezik a legjobb hidrodinamikai tulajdonságokkal a három mintázat közül. A termikus-tranziens mérés után azonban egyértelműen ki fog derülni, hogy melyik mintázat az optimális választás a hűtőrendszerbe.

12 Termikus-tranziens tesztelési módszer

A termikus-tranziens tesztelés segítségével lehetséges megmérni a hőútban elhelyezkedő parciális hőellenállásokat és parciális hőkapacitásokat, vagyis a hűtőeszköz és a hőforrás közötti hőellenállást meg lehet határozni mérés segítségével. A fűtőelem egy DPAK tokozású BJT-NPN teljesítmény-tranzisztor, amely szorosan hozzá van illesztve a mikrosatornákat tartalmazó szilíciumlapka aljához. A tranzisztor egyben egy hőmérsékletmérő is a mérési összeállításban, ugyanis a mérés során nem a folyékony fém hűtőközeg energiaváltozását mérjük, hanem a fűtőelemét. A tranzisztor bázis-emitter átmenet nyitófeszültségének változását mérve megállapítható a tranzisztor hőmérsékletváltozása. Ahhoz azonban, hogy a mérés pontos hőmérsékletet adjon, a bipoláris tranzisztor bázis-emitter diódájának nyitófeszültség hőmérsékletfüggését (K-faktor) pontosan meg kell határozni. Ez minden tranzisztornál változik, ezért az általánosan használt -2 mV/K mérőszámot alkalmazva csak közelítő adatokat kapnánk. A mérés elvégezése előtt a K-faktort meg kell határozni. [56][57]. A tranzisztor átlagos K-faktor értéke $-1,918 \text{ mV/K}$ -re adódott.

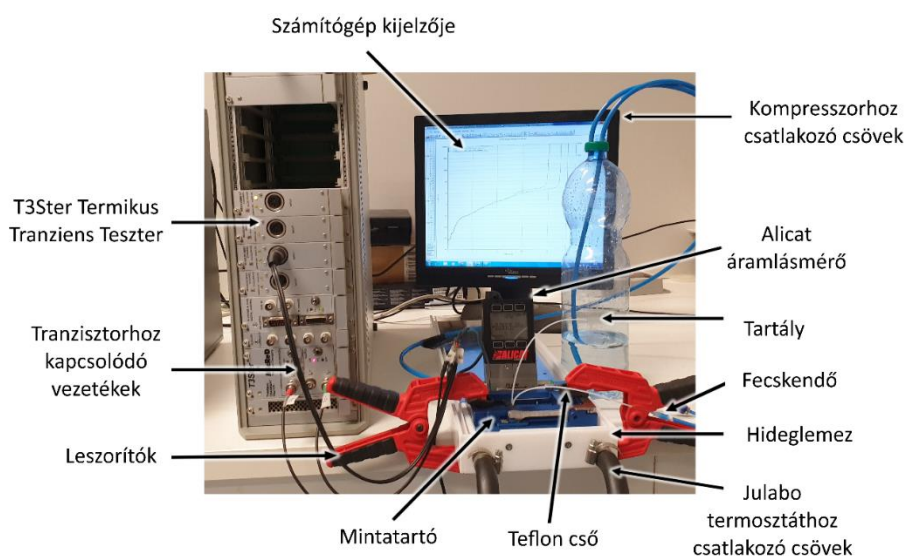
Minden mérési elrendezés esetén legalább két mérést el kell végezni, hogy a hűtőközeg áramlása során fellépő parciális hőellenállás megállapítható legyen. Az első mérés minden esetben a „nullás” mérés, vagyis hűtőközeg áramoltatása nélkül fel kell térképezni a rendszerben található hőutakat. Ez azért szükséges, mert a minták cseréje közben elmozdítom a mintatartót, ezáltal változnak a különböző hőutak. A második mérés már a minta megmozdítása nélkül történik, így biztosítva, hogy az egyedüli eltérés az elrendezésben az áramoltatott hűtőközeg legyen.



12.1. ábra: A hőút részei

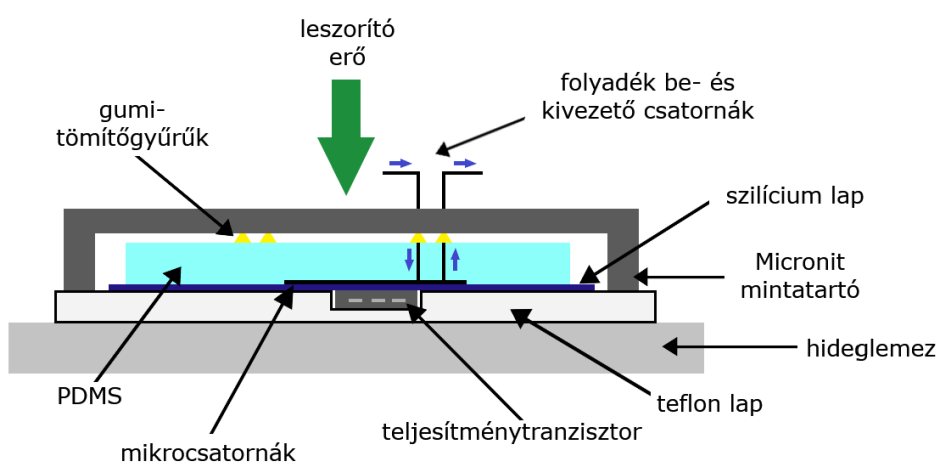
12.1 Mérési elrendezés

A parciális hőellenállás meghatározásához és a termikus tranziens görbe felvételéhez a T3Ster Termikus Tranziens Teszter eszközt használtam. Ez közvetlenül a teljesítmény-tranzisztorra van kötve, biztosítja a teljesítmény egységugrást és méri a hőmérsékletét. A T3Ster eszköz egy Windows operációs rendszeren futó szoftverrel kommunikál USB-porton keresztül, ezen keresztül lehet azt irányítani. A folyadék áramoltatásért egy légnyomással szabályozható rendszer felel. A rendszer fő tartálya egy palack, amely nyomás alatt lehet tartva egy kompresszor és egy reduktor segítségével. A beáramló levegő kiszorítja a palackban elhelyezkedő nagy tisztaságú vizet. A víz poliuretán csöveken keresztül halad a Galinstan tárolóüvege felé. Mivel a víz sűrűsége kisebb, mint a folyékony fémé, ha az üvegbe vezető cső az üveg tetején, valamint az üvegből kivezető cső vége az üveg alján van, úgy elérhető, hogy a nyomás hatására a Galinstan haladjon a mintázat felé tovább a víz helyett. Az utolsó poliuretán cső egy fecskendőn keresztül a mintatartó inletoldali teflon csövéhez csatlakozik. A beáramló fém mennyiségének méréséhez egy Alicat L-0.5CCM-D/10V áramlásmérőt használok, amelynek a kijelzett értéke alapján szabályozom a tartály előtt elhelyezkedő reduktort, amely a rendszer nyomását hivatott kontrollálni. Mivel az áramlásmérő a folyékony fémmel nem kompatibilis, így a vizes nyomásátadó szakasz alkalmazása indokolt. Természetesen, ha lenne olyan mérőeszköz, amellyel közvetlenül mérhető lenne a folyékony fém áramlása, úgy a vizes szakasz kihagyható lenne. Mivel a rendszer konstans nyomás alatt van tartva a mérések közben és szivárgásmentes is, így a víz áramoltatott térfogata megegyezik a folyékony fémével.



12.1.1. ábra: A mérési elrendezés

A mintát egy hideglemezre kell helyezni, így az termikus földpotenciálra kerül. Ehhez azonban szükséges volt leszerelni a plexilapot a mintatartó alól, így csak a teflon lap maradt a minta alatt. Ideális esetben a tranzisztor nem ér hozzá a hideglemezhez, ugyanakkor termikusan jól van csatolva hozzá, ezáltal egyaránt csökken a parallel hőút hőellenállása és a mérés időállandója is. A mintatartónak egy stabil alapra van szüksége, amit egy teflonlap biztosít. Továbbá a lap strukturális stabilitást is ad a tranzisztor számára, ugyanis az egy kimart mélyedésben helyezkedik el. A hideglemez az összes mérés alatt 25 °C-ra volt állítva egy Julabo F 25-ös labor termosztát segítségével, mely a lemezen belüli folyamatos vízárammal biztosítja a beállított hőmérsékletet.



12.1.2. ábra: A mintatartó keresztmetszeti képe

A mintatartó a leszorító erejét négy gumigyűrűn keresztül fejti ki a PDMS-re. Ez előnyös, ugyanis a tömítőgyűrűk nyomásra történő alakváltozásából kifolyólag kisebb pontossággal kell meghatározni a mintatartó magasságát a PDMS-hez képest. Emellett a leszorító erő összepréseli a PDMS nyílásait és a teflon csöveket, ezáltal a tömítések nem szivárognak. A teljesítmény-tranzisztor és a szilíciumlap között vékonyan felvitt hővezető paszta van, így biztosítva a jó termikus csatolást a két felület között.

12.2 Folyékony fémes termikus mérések

A mérések eredményeinek bemutatása előtt fontos kihangsúlyozni, hogy a termikus mérések végeredményeit nagyban befolyásolják olyan tényezők, amelyeket nem, vagy csak nagyon nehezen lehet kontrollálni. Már olyan kis jelentőségű tényezők is képesek nagy mértékű változásokat előidézni a végeredményben, mint például a leszorító erő, a légmozgás a laborban, a páratartalom változása vagy a minimálisan elmozdított mintatartó. Dolgozatomban a bemutatott mérési módszer alkalmazhatóságának bizonyítására fókuszáltam.

Összesen hat mérést végeztem el, minden esetben az azonos áramlási sebességet állítottam be a reduktoron. Ezzel a szimulációk során kapott nyomásesés-különbségeket tudtam kompenzálni. Értelemszerűen a végleges minta kiválasztása során a nyomásesés-különbségeit is figyelembe fogom venni, azonos áramlási sebességek hiányában viszont nehezen lehetne összehasonlítani a minták termikus tulajdonságait. Az áramlási sebesség minden esetben 0,5 ccm, vagyis 0,5 ml/perc. A mérések hossza a következő módon került meghatározásra: egy lekapcsolási jelenség során mértem a tranzisztor hőmérsékletét hűtőközeg áramoltatása nélkül. Amikor a tranzisztor már nem hűl jelentősen, vagyis a hűlési görbe vízszintessé válik, akkor tudható, hogy a mérés befejezhető. A mérés 450 másodpercig tartott, vagyis a tranziens 7,5 perc. Mivel a mérés előtt szükséges beállni hagyni a rendszert a végállapotára, amely szintén legalább 7,5 perc, ekként minden mérés valójában 15 percet vesz igénybe. A folyadékos mérések esetén tehát legalább 15 percnyi konstans áramlást kell biztosítani. Adódik, hogy legalább 7,5 ml folyadék szükséges a sikeres méréshez, ugyanakkor mérésenként ennél jóval több Galinstan szükséges, mert a mintatartó beállítása és tesztelése plusz folyékony fémre igényel. A többlet nélkül a fémre csak a mérési elrendezés szétszedésével lehetne visszatölteni a Galinstant tároló üvegbe, azonban ez nem lenne optimális, hiszen akkor újra szükséges lenne beállítani a mérési elrendezést. Ezen okokból kifolyólag a korábban kikevert 1 cm³ Galinstan kevésnek bizonyult. További 10 cm³ Galinstan került elkészítésre, hogy az áramlási ráta biztosítható legyen a termikus tesztek során. Ehhez 44,11 g gallium, 13,84 g indium és 6,44 g ón volt szükséges.

A mérések esetében mindig lekapcsolási jelenséget vizsgáltam, vagyis a tranzisztor felfűtésre került, majd a lekapcsolás utáni hűtési görbét rögzítettem. Az emitter-áram -0,1 A-re lett választva. A kollektor-bázis feszültség maximum értéke 10 V, a minimum értéke 1 V. A lekapcsoláskor a maximum értékről a minimum értékre esik a feszültség, vagyis egy 0.9 W-os teljesítménykülönbség lép fel. A tranzisztor átlagos K-faktor értéke -1,918 mV/K, így ezt alkalmaztam a számoláshoz. Ezen adatokat a T3Ster programjába írtam, hogy az tudja elemezni az eredményeket.

A mérések értékeléséhez először a rendszer struktúrafüggvényeit hasonlítom össze. Ezek sokat elárulnak a rendszer termikus tulajdonságairól, például le lehet róluk olvasni parciális hőellenállásokat. Ahhoz azonban, hogy a méréseket átfogóbban is lehessen értelmezni, érdemes kiszámolni a hűtőeszköz parciális hőellenállását is (R_{thcool}). Ehhez szükséges kikeresni a használt tranzisztor adatlapjából a tok hőellenállását (R_{thjc}), ami jelen esetben 6,25 K/W.

Amennyiben a kezdeti és folyadékos mérés esetén a rendszer teljes hőellenállása (R_{th}) ismert, úgy számolható az eszköz hőellenállása (R_{thca}) az alábbi formulával.

$$R_{thca} = R_{th} - R_{thjc}$$

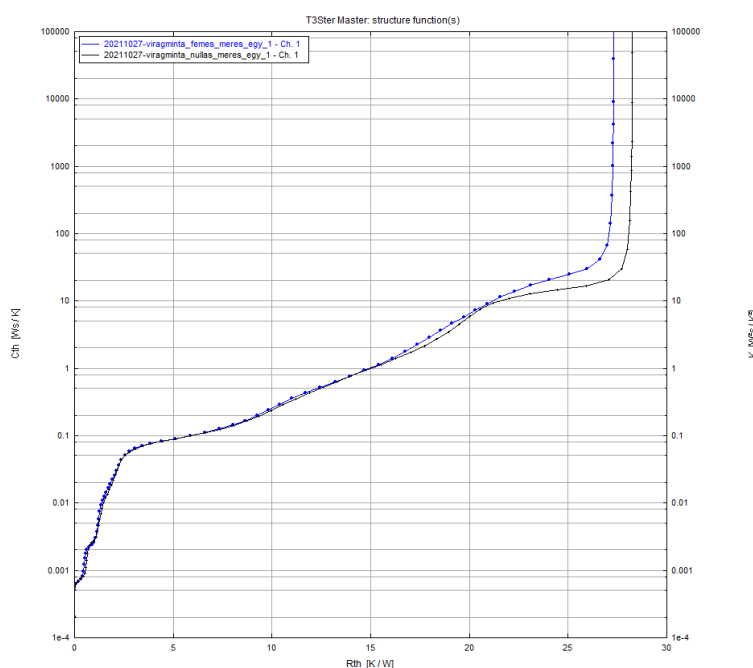
Amennyiben kiszámoljuk az eszköz hőellenállását a kezdeti és a folyadékos mérés esetén, úgy rendre előáll két eredmény, az R_{thca1} és R_{thca2} . A kapott eredményekből már számolható a hűtőeszköz parciális hőellenállása az alábbi képlettel [57].

$$R_{thcool} = \frac{R_{thca1} \cdot R_{thca2}}{R_{thca1} - R_{thca2}}$$

A mérési eredmények bemutatásakor a már kiszámolt R_{thcool} eredményeket fogom értékelni minden esetben. A következő fejezetekben bemutatott ábrákon minden esetben a bal szélhez közelebbi görbe a folyékony fémes mérés struktúrafüggvénye, a jobb oldalhoz közelebbi a parallel hűtőkatkat feltérképező kezdeti „nullás” mérést mutatja. Ez természetesen már azt előfeltételezi, hogy minden mérés során csökkent a termikus ellenállás a folyékony fém áramlása miatt.

12.2.1 Sima egyenes virágminta termikus mérése

A mérés kiértékelése után hamar látszott, hogy a folyékony fémmel történő mérés során valóban kisebb lett a rendszer hőellenállása a környezet felé.

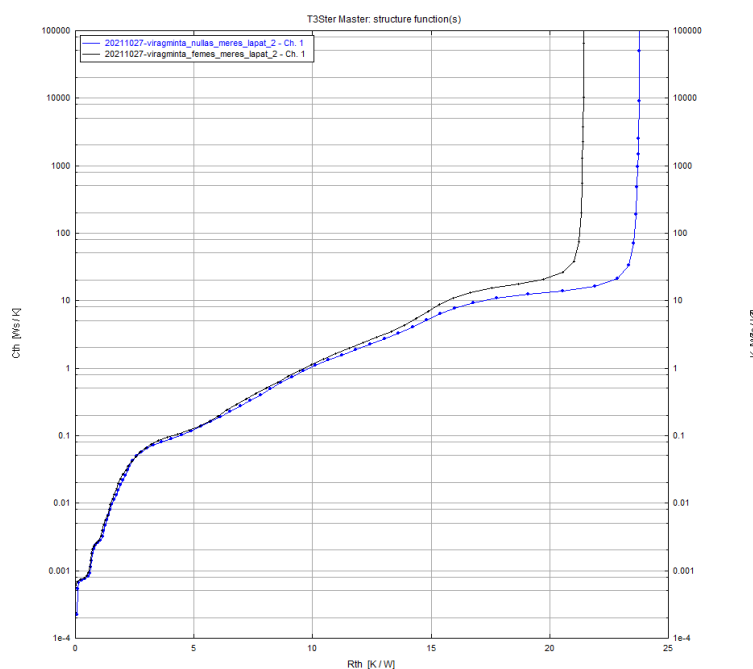


12.2.1.1. ábra: A sima egyenes virágminta struktúrafüggvénye

A kezdeti mérés során a végleges hőellenállás 28,19 K/W-ra adódott, míg a fémes esetben 27,29 K/W-ra. A két érték közötti különbség 0,9 K/W, vagyis a Galinstan ennyivel csökkentette a hőellenállás végértékét. A hűtőeszköz parciális hőellenállása a korábban bemutatott képletek alapján 512,91 K/W-ra adódott. Ez az eredmény eltér a várt értéktől, ugyanis bizonyos tényezők erősen eltorzították, ezért szükséges lesz a mérést újra elvégezni. A későbbi eredményekkel összehasonlítva, a kezdeti mérés hőellenállása túlságosan nagy, ami feltehetőleg a nem megfelelő leszorításból következett.

12.2.2 Lapátos virágminta termikus mérése

A szimulációk alapján ez a minta a legígéretesebb hidrodinamikai szempontból. A termikus mérés során kiderült, hogy jobb termikus tulajdonságokkal rendelkezik, mint a sima egyenes változat. A kezdeti mérés során a végleges hőellenállás 23,8 K/W-ra adódott, míg a fémes mérés esetében 21,37 K/W-ra. A két érték közötti különbség 2,43 K/W. Ez 1,53 K/W javulást jelent az először mért mintához képest. A mért, hűtési hatékonyságot leíró hőellenállás a kiértékelés után 109,2 K/W-ra adódott, ami jelentősen kisebb, mint a sima egyenes minta esetében számított érték.



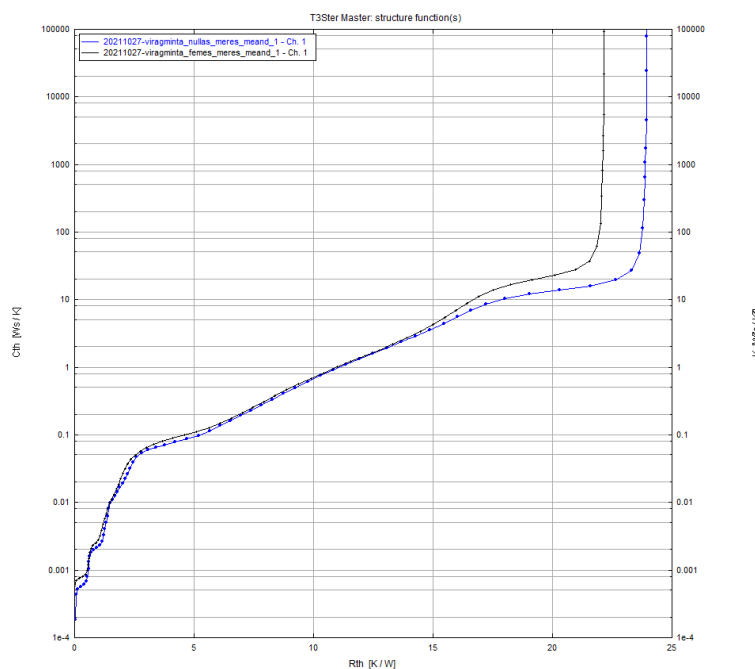
12.2.2.1. ábra: A lapátos virágminta struktúrafüggvénye

A javulás feltehetőleg a külső befolyásoló tényezők miatt ilyen számottevő. Fontos kiemelni, hogy az előzőleg bemutatott mintához képest itt jelentősen kisebb a mért hőellenállás a kezdeti mérés esetén, mely feltehetőleg a jobban sikerült leszorítás eredménye. Alapvetően a

folyékony fém minimálisan több időt tölt a teljesítmény-tranzisztor felett, ami szintén okozhatta a javulást.

12.2.3 Meanderes virágminta termikus mérése

Bár hidrodinamikai szempontból ez a minta szerepelt a legrosszabbul a szimulációk során, a nyomásesést kompenzáltam a reduktorral, így ez a minta jól szerepelt a termikus mérések során.



12.2.3.1. ábra: A meanderes virágminta struktúrafüggvénye

A kezdeti mérés eredményeként a végleges hőellenállás 23,96 K/W-ra adódott, míg a folyékony fém áramoltatása során mért érték 22,1 K/W. A két érték közötti különbség 1,86 K/W. A hűtőeszköz parciális hőellenállása 150,92 K/W-ra adódott. Ez nagyobb, mint amit sima egyenes minta esetében sikerült mérni. Annak ellenére, hogy a lapátos minta a mérések alapján jobban szerepelt, ez nem jelenti egyértelműen, hogy ez a minta ne lenne jó választás a végleges rendszerbe. Ezen mérés esetén is erősen befolyásolhatták a végeredményt a külső tényezők.

12.3 Folyékony fémes termikus mérés konklúziója

A sima egyenes virágminta szerepelt a legrosszabbul a termikus mérések során, ugyanis ezen minta esetén volt a legkisebb a javulás a fémes mérés esetén. A pontosság ez esetben megkérdőjelezhető, hiszen irreálisan nagy hőellenállást sikerült kiszámolni a mért értékekből, ami felveti a torzult mérési eredmények lehetőségét. A lapátos és a meanderes minta esetében a végeredmények közelebb állnak a várt értékekhez, azonban további mérések elvégzése szükséges. Ezen tényezők ellenére viszont egyértelműen látszik a mérési eredményekből, hogy a folyékony fém mint hűtőközeg, képes csökkenteni a rendszer hőellenállását. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy képest hőt szállítani. A hűtési hatékonysága további vizsgálatokat igényel, hiszen nincsen viszonyítási alap, azonban az biztató eredmény, hogy instabil mérési eredményeket biztosító tesztkörnyezet mellett is produkált hűtési teljesítményt a Galinstan. Amennyiben a kutatás során sikerül készíteni egy megbízható tesztkörnyezetet, a termikus mérések minősége nagyban javulni fog. A vizes mérésekkel összehasonlítva ki fog rajzolódni, hogy milyen beállítások mellett lesz jobb választás a folyékony fémes hűtőrendszer. Mindemellett egy viszonyítási alap is rendelkezésre fog állni az összehasonlításhoz.

13 Összefoglalás

A kutatás kezdetekor összehasonlítottam a szobahőmérsékleten folyékony fémeket. Ezen elemek bemutatásának fő célja az volt, hogy különböző szempontok alapján választani lehessen egy potenciális jelöltet, amely alkalmas lehet a folyékony fémes hűtőrendszer megvalósítására. A kutatás során világossá vált, hogy a Galinstan az optimális választás a hűtőrendszerbe, hiszen gyártása olcsó, nagy mennyiségben rendelkezésre áll, nem toxikus, és megfelelő anyagi paraméterekkel rendelkezik. Ezt követően összehasonlítottam a Galinstan fémét más hővezető közegekkel, és bemutattam, hogy a víznél miért lehet jobb alternatíva hőcserélő közegnek.

A CleWin maszktervező program segítségével több, mint 50 alakzatot készítettem. Ezekből kiválasztottam a legígéretesebbeket, melyeknek maszkjai gyártásra kerültek. Ezután arra fókuszáltam, hogy PDMS és SU-8 anyagokkal miként lehetséges tesztmintákat elkészíteni.

Miután elkészültek a maszkok, különböző fotolitográfias eljárásokkal létrehoztam SU-8-ból a rajtuk található alakzatokat szilícium szubsztráton. Ezeket az SU-8 mintázatokat a későbbiekben öntőformaként használtam. Miután kiöntésre kerültek PDMS-sel, előálltak a maszkok negatívjai az anyagon. A PDMS és az üveg rögzítési lehetőségei közül a plazmázásra esett a választás, ezzel rendkívül erős tapadást sikerült elérni a két anyag között. Nagy előrelépést jelentett a kutatásban, mikor legyártásra kerültek a tervezett alakzatok PDMS-ből, üveg szubsztráton, PTFE csöveket használva inletnek és outletnek. A gyártástól kezdve folyamatosan teszteltem a mintázatokat különböző folyadékokkal. Később az üveg szubsztrát szilíciumra lett cserélve, mivel ez az anyag jobb termikus tulajdonságokkal rendelkezik, mint a korábban használt üveg. A tesztelések során kikeverésre került a Galinstan fém is.

A mérésekkel egyidejűleg különböző alakzatokat szimuláltam a COMSOL nevű programmal. Elsősorban a virágminták áramlási profiljait vizsgáltam, amihez turbulens modelleket készítettem. A termikus-tranziens tesztelési módszerrel sikerült méréseket végezni és elkészíteni egy alapvető mérőrendszert. A Galinstan-fémmel való tesztelések nagy kihívást jelentettek a téma újszerűsége miatt. A mérés az eredmények pontatlanságát leszámítva nagy előrelépést idézett elő a kutatás jövője szempontjából.

A kutatás elkövetkezendő fázisának szempontjából a termikus mérések standardizálása és optimalizálása elsődleges cél lesz. Amennyiben sikerül egy stabil tesztkörnyezetet készíteni,

akkor az majd megbízható mérési adatokkal tud szolgálni, ami a kutatás jövője szempontjából elengedhetetlen.

Mindemellett komplett rendszerek szimulációját tervezem elvégezni, ami nem csak áramlást, hanem hőtranszfert is tartalmaz. A szimulációk segítségével szeretném optimalizálni a hűtőrendszert a maximális hűtési teljesítmény elérésének érdekében. Továbbá a gyártástechnológiai részről szeretnék kidolgozni egy eljárást, mely lehetővé teszi a PDMS pontos és roncsolásmentes átszúrását. A későbbiekben pedig termikus aspektusból szeretném összehasonlítani a folyékony fémeket más hővezető közegekkel, például vízzel és levegővel.

A kutatás eredményeképpen egy olyan komplex folyékony fém hűtőközegen alapuló mikro-hűtőrendszer állítható elő, amely nemcsak megoldást nyújthat a jelenlegi termikus tervezési problémák egy részére, hanem alapjaiban megváltoztathatja a hűtőrendszerekről alkotott elképzeléseket. Végül egy olyan új technológiai irányvonal rajzolódhat ki, amely az iparban és tudományos körökben egyaránt széleskörűen alkalmazható lehet.

14 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulenseimnek, Dr. Neumann Péternek és Dr. Bognár Györgynek, hogy szakértelmükkel és a konzultációk során adott tanácsaikkal nagy segítséget nyújtottak a dolgozat elkészítéséhez. Továbbá szeretném megköszönni Dr. Takács Gábornak hozzájárulását a termikus mérések elvégzéséhez. Köszönet illeti emellett az EK-MFA munkatársait, akik segítsége nélkül nem tudtam volna legyártani a kutatáshoz szükséges maszkokat.

Irodalomjegyzék

- [1] A szilícium chippek maximális működési hőmérséklete - EXTREME-TEMPERATURE ELECTRONICS: <http://www.extremetemperatureelectronics.com/tutorial3.html> (2021. szept.)
- [2] Modern, nagy számítási teljesítményű processzorok teljesítménye - buildcomputers.net: <https://www.buildcomputers.net/power-consumption-of-pc-components.html> (2021. szept.)
- [3] Modern, nagy számítási teljesítményű videókártyák teljesítménye - Tom's Hardware: <https://www.tomshardware.com/reviews/geforce-radeon-power,2122.html> (2021. szept.)
- [4] A WHO higanyról közzétett jelentései - WHO: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> (2021. szept.)
- [5] A higany ára – ChemicalBook: <https://www.chemicalbook.com/Price/MERCURY.htm> (2021. szept.)
- [6] A Minamata Egyezményt tartalmazó dokumentum – EU: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0852&from=FI> (2021. szept.)
- [7] A cézium anyagi tulajdonságai - Royal Society of Chemistry : <https://www.rsc.org/periodic-table/element/55/caesium> (2021. szept.)
- [8] A cézium és rubídium ára - Institute for rare earths and metals AG: <https://en.institut-seltene-erden.de/our-service-2/Metal-prices/high-purity-metals-prices/> (2021. szept.)
- [9] A francium anyagi tulajdonságai - Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/87/francium> (2021. szept.)
- [10] A rubídium anyagi tulajdonságai - Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/37/rubidium> (2021. szept.)
- [11] A rubídium kinyerése, fizikai és kémiai tulajdonságai – Los Alamos National Laboratory, <https://periodic.lanl.gov/37.shtml> (2021. szept.)
- [12] United States. Office of Naval Research. Committee on the Basic Properties of Liquid Metals, U.S. Atomic Energy Commission, United States. Navy Department. Bureau of Ships.: *Liquid-metals Handbook*, U.S. Government Printing Office, 1952, pp. 117.
- [13] BASF Corporation.: *Sodium- Potassium Alloy (NaK) Technical Data Sheet*, 2004
- [14] A Danamics LMX Superleggera CPU hűtésének leírása - NVIDIA, <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/forums/discover/100310/danamics-lmx-superleggera-liquid-metal-cpu-cooler-review/> (2021. szept.)
- [15] Jing Liu, Lei Sheng, Zhi-Zhu He.: *Liquid Metal Soft Machines: Principles and Applications*, ISBN 978-981-13-2708-7, Springer, 2018, pp. 14.

- [16] A gallium ára - Amazon: <https://www.amazon.com/Gallium-99-99-Pure-000g-Kilogram/dp/B0151SRSPK> (2021. szept.)
- [17] A gallium gyártási helyei, további tulajdonságok - Minor Metals Trade Association: <https://mmta.co.uk/metals/ga/> (2021. szept.)
- [18] A gallium tulajdonságai - Britannica: <https://www.britannica.com/science/gallium> (2021. szept.)
- [19] C. N. Cochran and L. M. Foster.: *Reactions of Gallium with Quartz and with Water Vapor*, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 109, NO. 2, 1962, pp. 152.
- [20] Shanliangzi Liu.: Gallium-Based Room Temperature Liquid Metals and its Application to Single Channel Two-Liquid Hyperelastic Capacitive Strain Sensors, A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science, 2015
- [21] A gallium - indium ötvözet tulajdonságai - National Center for Biotechnology Information: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6119961/> (2021. okt.)
- [22] A gallium - ón ötvözet olvadáspontja - American Elements: <https://www.americanelements.com/gallium-tin-alloy>
- [23] A gallium - indium - ón - cink ötvözet tulajdonságai - Matweb: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e7b61ba887f948fc87f55d0220e6282e&ckck=1> (2021. okt.)
- [24] Tingting, Hao & Ma, Hongbin & Ma, Xuehu.: *Experimental Investigation of Oscillating Heat Pipe With Hybrid Fluids of Liquid Metal and Water*, Journal of Heat Transfer, Vol. 141, 2019, pp. 3, table 1
- [25] 1 kg indium ára - RotoMetals: <https://www.rotometals.com/indium-99-99-pure-1-kg-ingot/> (2021. okt.)
- [26] 1 kg ón ára - Daily Metal Prices: <https://www.dailymetalprice.com/metalprices.php?c=sn&u=kg&d=1> (2021. okt.)
- [27] 1 kg Galinstan ára - Alibaba: https://www.alibaba.com/product-detail/1kg-Liquid-Galinstan-Metal-Price-for_60728520594.html (2021. okt.)
- [28] A Galinstan paraméterei - ThoughtCo: <https://www.thoughtco.com/what-is-galinstan-2340177> (2021. okt.)
- [29] A higany anyagi tulajdonságai - Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/80/mercury> (2021. okt.)
- [30] A higany anyagi tulajdonságai - Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie: <http://www.uwm.edu.pl/kchem/mercury/mercury.html> (2021. okt.)
- [31] A cézium anyagi tulajdonságai - AZoNetwork: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9099> (2021. okt.)

- [32] A francium anyagi tulajdonságai - Lenntech: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/fr.htm> (2021. okt.)
- [33] A francium anyagi tulajdonságai - American Elements: <https://www.americanelements.com/francium.html> (2021. okt.)
- [34] A rubídium anyagi tulajdonságai - Lenntech: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/rb.htm> (2021. okt.)
- [35] Foust, O. J.: *Sodium-NaK engineering handbook*, United States Atomic Energy Commission, ISBN 978-0-677-03030-2, Gordon & Breach, 1976, pp. 11.
- [36] A szilícium anyagi tulajdonságai - Lenntech: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/si.htm> (2021. okt.)
- [37] Különböző anyagok elektromos ellenállása - ThoughtCo: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499> (2021. okt.)
- [38] Különböző fémek hőkapacitása - Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html (2021. okt.)
- [39] A Thermal Grizzly Conductionaut adatlapja - Thermal Grizzly: <https://www.thermal-grizzly.com/images/downloads/TG-Datasheet-Conductionaut-EN.pdf> (2021. okt.)
- [40] A Thermal Grizzly Conductionaut gyártói oldala - Thermal Grizzly: <https://www.thermal-grizzly.com/en/products/26-conductionaut-en> (2021. okt.)
- [41] A víz anyagi tulajdonságai - Britannica: <https://www.britannica.com/science/water/Physical-properties> (2021. okt.)
- [42] A víz ára - Fővárosi Vízművek: https://www.vizmuvek.hu/hu/fovarosi-vizmuvek/lakossagi-ugyfelek/altalanos_informaciok/dijszabas/szolgalatasok_dijszabasa (2021. okt.)
- [43] A víz elektromos vezetési képessége - Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html (2021. okt.)
- [44] A levegő anyagi tulajdonságai - Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html (2021. okt.)
- [45] Az alumínium ára - Insider: <https://markets.businessinsider.com/commodities/aluminum-price> (2021. okt.)
- [46] Különböző fémek hőmérséklet-vezetési képessége - Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html (2021. okt.)
- [47] Az alumínium anyagi tulajdonságai - Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium> (2021. okt.)

- [48] A réz ára - Insider: <https://markets.businessinsider.com/commodities/copper-price> (2021. okt.)
- [49] A réz anyagi tulajdonságai - ThoughtCo: <https://www.thoughtco.com/copper-facts-chemical-and-physical-properties-606521> (2021. okt.)
- [50] A szilícium-karbid anyagi tulajdonságai - Accuratus: <https://accuratus.com/silicar.html> (2021. okt.)
- [51] Qian, Jin-yuan, Chen, Min-Rui, Liu, Xue-ling, Jin, Zhi-jiang.: *A numerical investigation of the flow of nanofluids through a micro Tesla valve*. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 20. 10.1631/jzus.A1800431, 2018
- [52] Alumínium marása TMAH alapú oldószerrel - MicroChemicals GmbH: https://www.microchemicals.com/technical_information/aluminium_etching.pdf (2021. máj.)
- [53] Yu Hongbin, Zhou Guangya, Chau Fook Siong, Wang Shouhua, Lee Feiwen.: *Novel polydimethylsiloxane (PDMS) based microchannel fabrication method for - lab-on-a-chip application*, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 137, Issue 2, 2009, Pp. 754-761,
- [54] A PDMS anyag leírása - Elveflow: <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/the-polydimethylsiloxane-pdms-and-microfluidics/> (2021. okt.)
- [55] Az SU-8 anyag leírása - MEMScyclopedia: <https://memscyclopedia.org/su8.html> (2021. okt.)
- [56] Rozsas Gabor, Bognar Gyorgy, Takacs Gabor, Plesz Balazs.: *Improved process for the manufacturing of back contact integrated cooling channels for concentrator solar cells*, 2019 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP), 2019, pp. 3
- [57] Takács Gábor.: *Integrált Mikrocsatornás Hűtőeszközök Modellezése És Karakterizációja*, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, Doktori (Ph.D) értekezés, 2017

Függelék

[6.1.1. ábra] A PDMS formulája – Elveflow: <https://www.elveflow.com/wp-content/uploads/2015/01/PDMS-formula.jpg> (2021. okt.)

A nem hivatkozott ábrák saját készítésűek.