



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Rózsás Gábor

**INTEGRÁLT MIKROCSATORNÁS
HŰTŐSZERKEZETET TARTALMAZÓ
SYSTEM-ON-PACKAGE ESZKÖZÖK
TECHNOLÓGIÁJA**

KONZULENS

Dr. Bognár György;
Dr. Földvály-Bándy Enikő;
Takács Gábor

BUDAPEST, 2016

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	3
2 Integrált mikroméretű hűtőcsatornák	5
2.1 System-on-Package eszközök.....	5
2.2 Mikroméretű hűtőbordák alkalmazása.....	8
2.3 A termikus tranziens tesztelés.....	10
2.4 Korábbi minták termikus karakterizációja.....	12
3 Az anizotróp marás.....	15
3.1 Anizotróp marási módszerek és maszkolórétegek.....	16
3.2 A TMAH marási mechanizmusa	17
3.3 (100) felületi orientáltságú Si tömbi marása.....	19
4 Az új eszköz megtervezése	21
4.1 A diffúziós lépések megtervezése.....	22
4.2 Az oxidációs folyamatok tervezése	23
4.3 A TMAH marás tervezése	25
4.4 A fémezés és kontaktusok kialakítása	26
5 Az integrált eszköz technológiai utasítása	28
6 A csatornák lezárása.....	35
7 A technológia és a kész minták minősítése	37
7.1 A gyártási technológia minősítése	37
7.2 A diódák mérése és minősítése	39
7.3 A csatornák minősítése	41
8 Jövőbeli tervek	42
9 Összefoglalás.....	43
Irodalomjegyzék.....	44
Függelék.....	46

1 Bevezetés

A fokozatos méretcsökkenésnek és a Moore-törvényen is túlmutató integrációnak következtében a félvezető eszközök egységnyi felületre vett disszipációja fokozatosan növekszik. A megnövekedett hőáram elvezetése a lehető legkisebb hőellenállású út irányába új struktúrájú, mikroméretű és integrált hűtőeszközök alkalmazását igényli. [1]

A *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszékének* (BME EET) kutatás-fejlesztési tevékenysége eredményeként kidolgozott termikus tranzienstesztelés alkalmas különböző makroméretű passzív és aktív hűtőeszközök termikus karakterizációjára. A jelenleg folyó kutatómunka célja olyan mérőberendezés és mérési eljárás kidolgozása, amely alkalmas mikroméretű integrált hűtőeszközök termikus és elektro-termikus karakterizációjára.

A mérőrendszerben ezidáig a disszipáló forrást egy teljesítménytranzisztor jelentette, mely a mérendő hűtőeszközhöz volt erősítve. A kutatómunkába bekapcsolódva a feladatom olyan aktív integrált félvezetőeszközök megtervezése és megvalósítása volt, melyeket mikroméretű hűtőcsatornákkal együttesen kialakítva, lehetővé válik a külső disszipáló elem nélküli, közvetlen termikus gerjesztés és hőmérsékleti gradiens kialakítása magának az integrált áramkörnek a felületén.

Célunk, hogy a szilícium szeletekre egy technológiai soron belül hozzunk létre hődisszipáló félvezető eszközöket, valamint az ellentétes oldalra CMOS kompatibilis anizotróp marással készült mikroméretű hűtőcsatornákat. Ezzel lehetővé válik az integrált mikroméretű hűtőbordák hőátadási folyamatainak vizsgálata és karakterizálása.

Munkám során az EET tisztatéri mikroelektronikai laboratóriumában elérhető technológiákat, berendezéseket és eljárásokat alkalmaztam. Létrehoztam egy olyan reprodukálható technológiai lépéssort, amelynek felhasználásával különböző karakterisztikájú fűtődiódákkal egybeintegrált, eltérő csatornageometriájú (chipeket) mintákat készítettem el és vizsgáltam meg elektromos és termikus mérésekkel. Szintén szilícium szelet anizotróp marásával elkészítettem olyan beömlő nyílásokat, melyekkel a csatornákat lezárva a mintáink alkalmassá válnak gáz halmazállapotú közegek (levegő, nitrogén) áramoltatására.

A munka folytatásaképpen a következő célunk, hogy a szeletek egymáshoz bondolásával, és egy speciális befogószerkezettel a mintákat alkalmassá tegyük az

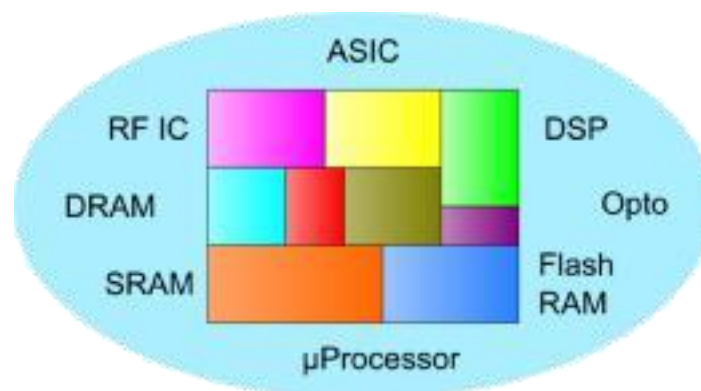
újonnan kifejlesztett mérőrendszerrel való vizsgálatra. Hosszú távú célunk olyan integrált CMOS kompatibilis hűtőeszközök kifejlesztése és hatékonysági vizsgálata, melyek megoldást jelentenek napjaink nagy számítási teljesítményű áramköreinek hűtési problémáira.

2 Integrált mikroméretű hűtőcsatornák

Integrált áramkörökben az egységnyi felületre integrált tranzisztorok száma és az áramkörök működési sebessége is rohamosan növekszik. A Moore-törvénynek megfelelően másfél-, kétévente megduplázódik az egységnyi felületre integrálható tranzisztorok száma. Gordon Moore jóslata 1965-től mind a mai napig helytállóan 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.

2.1 System-on-Package eszközök

Az ún. Moore törvényén túli integráció első lépése a '80-as évek közepétől fontos kutatási témává vált rendszerintegráció, melynek első eredménye az úgynevezett System-on-Chip (SoC) áramkörök megalkotása volt. Ezen elgondolás szerint egy félvezető hordozóra több áramköri blokk kerül kialakításra, mint például analóg és digitális részek, memóriák, RF-áramkörök stb. (2.1. ábra). A tervezési nehézségek már korán megmutatkoztak, hiszen az áramköri részek a közös szubsztrát miatt csatolásban vannak egymással, amely hatás a tervezés korai fázisában nem vizsgálható. A másik jelentős problémát az áramköri egységek technológiai inkompatibilitása jelentette, például a CMOS áramkör és a DRAM memória vagy különböző érzékelő eszközök sokáig nem voltak elkészíthetőek egy félvezető felületen.



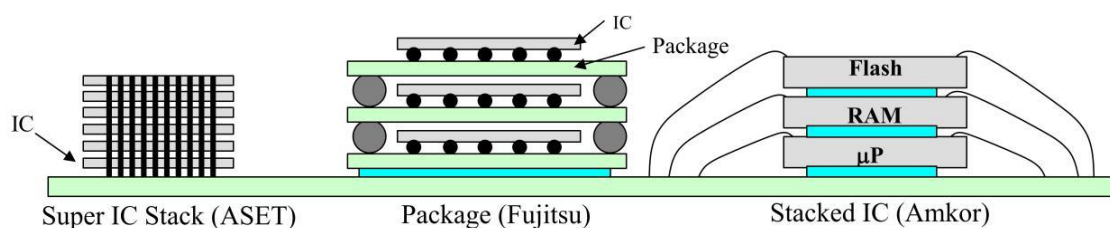
2.1. ábra: Egy szilíciumlapkán megvalósítható áramköri modulok [1]

A felmerült problémákra jelentett megoldást a Multi-Chip-Modul (MCM) technológia alkalmazása, amelyben több áramköri részegység (félvezető eszközök, felületszerelt kapacitások, induktivitások, szenzoráramkörök) kerül rögzítésre egy

nyomtatott huzalozású lemezen vagy kerámia hordozón. A különböző modulokon lévő áramkörök összeköttetéséről a közös hordozón kialakított vezetékezés gondoskodik. Az egymástól távolabb lévő áramköri modulok összeköttetésein fellépő jelentős késleltetés és a modul nagy mérete miatt – rádiófrekvenciás áramkörök, zajérzékeny eszközök esetén – az elgondolást mind technológiailag, mind a könnyebb integrálhatóság miatt további fejlesztésre szorult.

A mikroelektronikai technológia fejlődése tette végül lehetővé a System-On-Chip rendszerek kialakítását, ahol egy közös félvezető hordozón akár integrált DDR3 memóriavezérlő, gigabites hálózati csatoló, grafikus processzormag(ok) is kerülhetnek a hagyományos értelemben vett általános célú processzormag(ok) mellé. Hordozható eszközökben ("okos" mobiltelefonok, tablet eszközök) további érzékelő mikroszerkezetek (gyorsulásérzékelők, hőmérsékletérzékelők, giroszkóp) kerülhetnek kialakításra egy félvezető hordozón.

Az integráltság növekedése azonban nem csak a félvezetők felületén valósulhat meg, hanem térben is az ún. 3D integrációnak köszönhetően. A harmadik térdimenzió kihasználása többféle képpen lehetséges, ahogy azt a 2.2. ábra mutatja. Könnyen belátható, hogy az ilyen tokok esetén az egységnyi felületre jutó disszipáció jelentősen megnövekedhet. Ez további, termikus szempontból is optimalizált áramkörtervezési megoldások (elektrotermikus szimuláció, termikus szempontú elrendező algoritmusok stb.) alkalmazását, újfajta mérési és karakterizációs eljárások kidolgozását követeli meg.

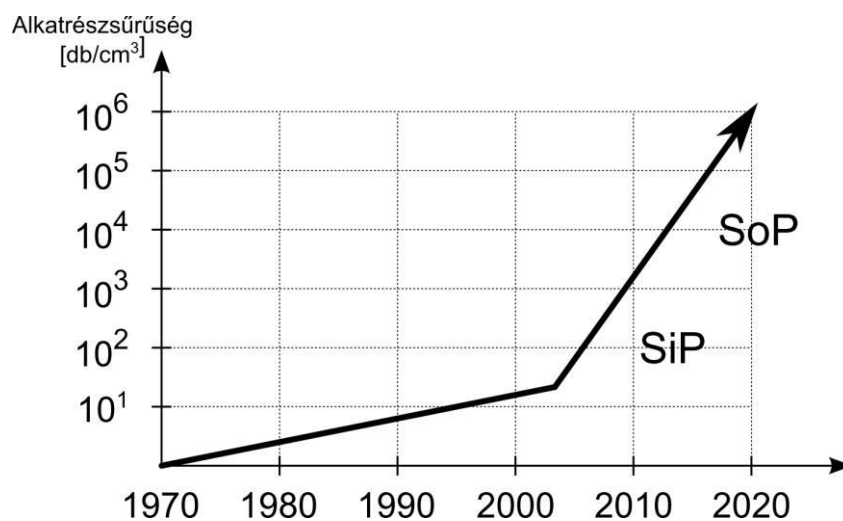


2.2. ábra: 3D tokozás különböző megvalósításai [1]

Az egymásra épített szilíciumlapkák közötti elektronikus kapcsolat létrehozásához, valamint technológiai és termikus okokból a hordozók vastagságát a korábbi 700-800 μm -ről 50-80 μm -re csökkentették, melynek hatására az összekötni kívánt, különböző lapkán lévő áramköri blokkok vertikálisan közelebb kerültek egymáshoz. Az elektromos kapcsolatról modern technológiák alkalmazása esetén TSV (Through Silicon Via) átvezetések gondoskodnak. Hagyományos piramis elrendezés

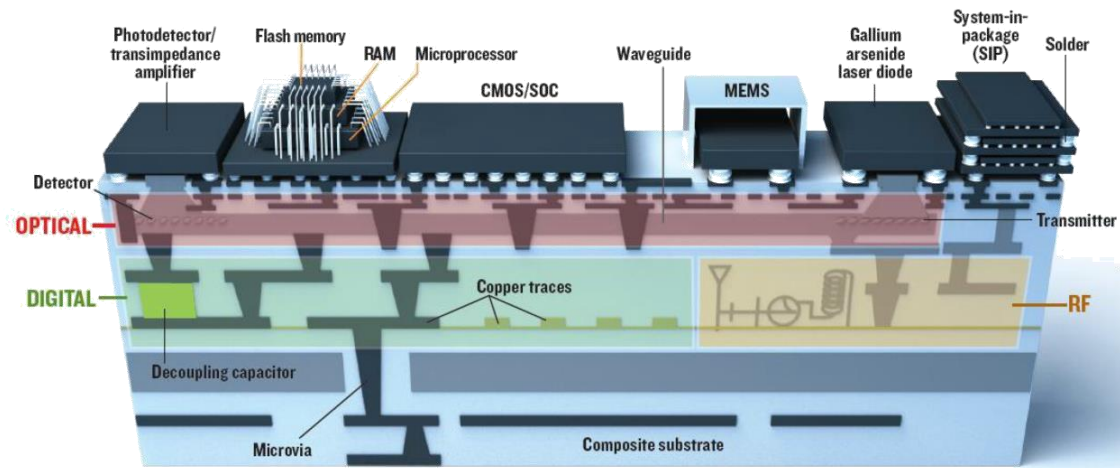
esetén (amikor az egymásra helyezett chipok mérete felfelé haladva fokozatosan csökken) mikrovezetőkötések valósítják meg a kapcsolatot a chipok között.

Az MCM-hez képest ugyan jelentős méretcsökkenést lehet elérni a 3D tokozással, viszont a kivezetések száma és sűrűsége jelentősen megnőtt. A rendszer többi komponensével való elektromos kapcsolat kialakítása és a jelentősen megnövekedett kivezetés szám megvalósítása komoly technológiai kihívást jelent. Az igazán jelentős áttörést az integrációban a System-on-Package (SoP) rendszer jelenti, amelyben egy teljes rendszer egységnyi térfogatában elhelyezhető alkatrészek száma több nagyságrenddel is több lehet, mint a korábbi csúcstechnológián (2.3. ábra).



2.3. ábra: Rendszerek alkatrészsűrűség változása az utóbbi három évtizedben [1]

Az elnevezés olyan integrált és komplex rendszert takar, amely egy tokban egyesíti egy komplett elektronikus rendszer minden funkcióját megvalósító elemeket. SoP eszközökben a tokozás látja el a rendszer egyes komponensei (integrált áramkörök, félvezető-alapú érzékelők, passzív eszközök, áramforrások stb.) közötti kapcsolat megteremtését és a komponensek hordozását, azonfelül maga a tokozás is integrált. Az interposer nem csak összeköttetést valósít meg, hanem eszközöket is tartalmaz. Az elképzelés annyiban több egy multichip-modulnál vagy a System-in-Package (SiP) eszközöknél, hogy mindezt 3D-ben, integráltan és minden komponens (érezkelők, hűtőeszközök, tápellátás) miniaturizálása mellett történik. SoP eszközökben a rendszerchipok (SoC), MEMS alapú érzékelők, beavatkozók, analóg és RF eszközök (pl.: antenna), elektro-optikai átalakítók, termikus menedzsmentért felelő eszközök együttesen egy „rendszer a tokban” koncepciót valósítanak meg a 4. ábrának megfelelően.



2.4. ábra: System-on-Package rendszerek felépítése [1]

Hasonlóan az egy hordozón kialakított számítógépekhez (Single Board Computer), az SoP eszközök esetén cél lehet az egy tokban megvalósított számítógép kialakítása (hűtőeszközzel, DRAM memóriával és SSD tárolóval, esetleges áramforrással együtt).

A tervezési, gyártási és megbízhatósági kérdések megválaszolása napjaink fő kutatási feladatai közé tartoznak. A legfontosabb témák az integrált áramkörök és a tokozás összeköttetésének megvalósítása, a tápellátás kérdése, a passzív komponensek integrációja, a csatlakozási felület, valamint a termikus struktúra és az integrált hűtés kialakítása. Már a 2D áramkörök esetén is nagy problémát okoz a disszipációból származó hő legkisebb termikus ellenállású úton való elvezetése. A 3D tokozás és a miniaturizálás hatására az eszközök egységnyi felületre vett disszipációja rohamosan növekszik (akár $100\text{W}/\text{cm}^2$ fölé). További problémát jelent, hogy a túlmelegedés mellett a hőmérsékletváltozásra érzékeny áramkörök egyes paraméterei jelentősen romolhatnak, ami akár működésképtelenséghez is vezethet. [1]

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.

2.2 Mikroméretű hűtőbordák alkalmazása

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, emellett a termikus hőellenállása nagy, ezért új típusú hűtőeszközök kifejlesztése szükséges. Egy

lehetséges megoldás a hőút hosszának és így a hőellenállásnak a csökkentésére a mikroméretű hűtőeszközök alkalmazása. Ennek egyik megvalósítása az integrált áramkörök hordozójában kialakított mikroméretű csatornák hálózata, melyben légnemű vagy folyadék halmazállapotú közeget keringtetve a hagyományos hűtőbordáknál nagyságrendekkel nagyobb hőátadási együttható érhető el. Az elgondolás alapja az, hogy a kb. 150-300µm 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 (RIE, wet- etching) 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 disszipációsűrűség érhető el, továbbá elhagyható néhány réteg termikus határfelületi anyag (TIM - Thermal Interface Material). Az ilyen integrált hűtési rendszerek igazi jelentősége a SoP rendszerekben mutatkozna. Továbbá a 3D tokozás miatt a jelentősen megnövekedett hőteljesítmény elvezetése a köztes lapkákról is megvalósíthatóvá válik. A megengedhető maximális disszipációsűrűség növelése lehetőséget teremt nagyobb komplexitású és nagyteljesítményű áramkörök működtetésére.

Komoly kihívást jelent egy ilyen - akár integrált formában akár diszkrét módon megvalósított - mikroméretű hűtőeszköz termikus karakterizációja. A mikrohűtőbordák jellemzésére három fontos paramétert kell vizsgálni: a hőkapacitást, a hőellenállást és a hőátadási tényezőt. Az úgynevezett volumetrikus hőkapacitás megadja, hogy egységnyi térfogatú anyag egy Kelvin-fokos hőmérsékletváltozáshoz mekkora energiaközlés szükséges. A termikus ellenállás az anyag hővezető-képességét írja le, azaz megadja, hogy adott hőteljesítményt az egyik végpontra kapcsolva a két végpont között mekkora hőmérsékletkülönbség adódik. A hőátadási tényező az egységnyi felületre vett hőátviteli képességet adja meg.

A kisméretű hűtőeszköz nagy előnye, hogy hőellenállása rendkívül kicsi, ezáltal az egységnyi felületre vett hatékonysága túlmutat a hagyományos hűtőbordákén. Az elszállított hőmennyiség arányos az átáramoltatott hűtőközeg tömegével, így a karakterizáció során azt szükséges meghatározni, hogy adott kialakítású mikrohűtőeszköz

különböző gáz- vagy folyadékáramlás esetén mekkora hőmennyiséget képes elszállítani. Ezen érték meghatározásához speciális karakterizációs eljárást kellett kidolgozni.

A mérés alapját a termikus tranziens tesztelés eljárás jelenti, amelynek köszönhetően nemcsak az egész rendszer teljes hőellenállása állapítható meg az aktív terület és a környezet között, hanem a hővezetési út ún. parciális hőellenállásértékei is. A módszer alkalmazásával tehát magának a mikrohűtőbordának a csatornáiban áramló közeg (legyen az légnemű vagy folyadék halmazállapotú) áramlási sebességtől függő parciális hőellenállása megállapíthatóvá válik. [2]

2.3 A termikus tranziens tesztelés

A mikroméretű hűtőbordák karakterizációs eljárása a termikus tranziens tesztelésen alapul, ami számos JEDEC szabványban rögzített mérés technikamódszer alapját képezi. A termikus tranziens tesztelést követő struktúrafüggvény-analízis során nem csak a teljes aktív terület és a környezet, vagy az aktív terület és a tok termikus ellenállását tudjuk meghatározni, hanem azonosíthatjuk a fő hűtőben található egyes parciális hőellenállás és hőkapacitás (termikus impedancia) értékeket. A termikus tranziens mérés feltétele a mérés során az egy dimenziós hűtő biztosítása. A termikus tranziens tesztelést sikeresen alkalmazták a makroméretű hűtőeszközök karakterizációjára és igazolták, hogy ez egy hatékony és megbízható eljárás a hűtőjének feltérképezésére. [3]

A termikus tranziens mérés során az állandósult állapotú rendszerre ismert értékű teljesítmény egységugrás gerjesztést adunk, és a vizsgált áramkör disszipációugrás következtében fellépő hőmérsékletváltozását folyamatosan mérjük és tároljuk. A mérést egészen addig folytatjuk, míg el nem érünk egy újabb egyensúlyi állapotot, ahol az egységugrás gerjesztés következtében már nem változik tovább a hőmérséklet.

A kezdeti és a végállapot hőmérséklet különbségéből (ΔT) és az ismert teljesítményváltozás nagyságából (ΔP) kiszámolhatjuk az egész rendszert jellemző hőellenállást (R_{thja}).

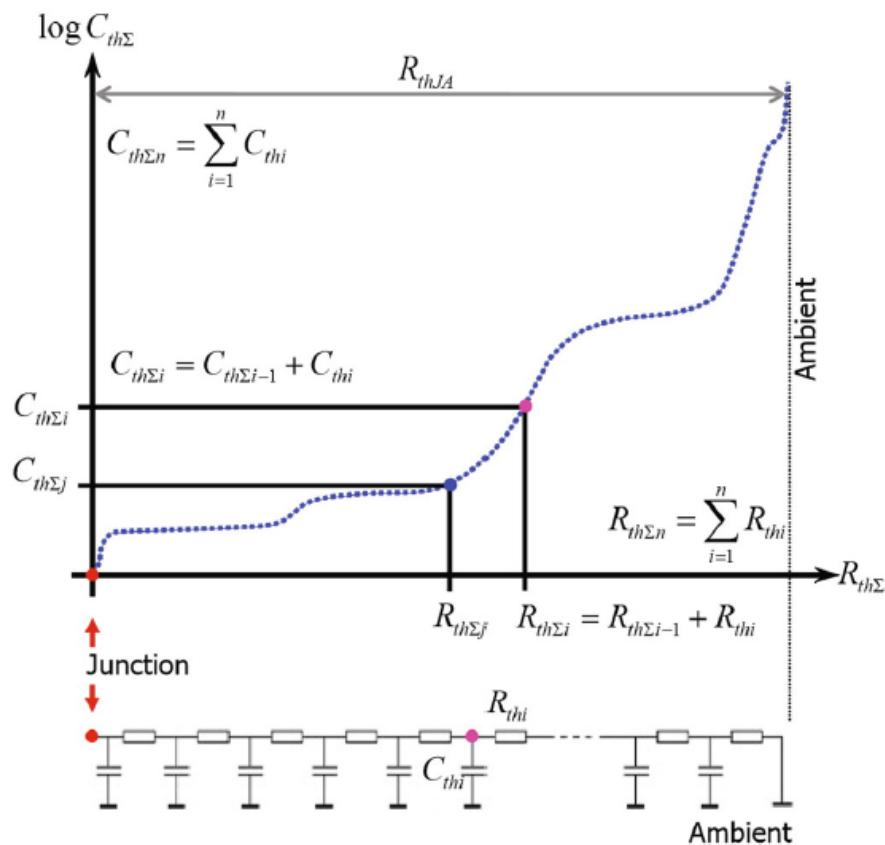
$$R_{thja} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (2-1)$$

Ez a hőellenállás érték megadja a félvezető aktív területe, az átmenet (junction) és a környezet (ambient) közötti teljes hőellenállás értékét. A probléma ezzel az eljárással,

hogy csak a teljes hőutat jellemző, ún. kumulatív hőellenállás értéket tudjuk meghatározni.

Ahhoz, hogy megoldjuk ezt a problémát termikus tranziens mérést kell végeznünk. A kiértékelés fő eleme a termikus rendszer időálló spektrumának azonosításán alapszik, a mért termikus tranziens dekonvolúciója által. A junctiontól a környezetig tartó hővezetési út kumulatív és differenciális struktúrafüggvényét az időálló spektrumból állítjuk elő.

A kumulatív struktúrafüggvény egy közvetlen leképezése a kumulatív termikus kapacitás és a kumulatív termikus ellenállás kapcsolatának, a hőforrás és a termikus föld között. Ennek következtében a görbe kezdete megfelel a disszipáló elemnek és a függvény mindig aszimptotikusan végződik a környezet elméletben végtelen termikus kapacitását jelezve.



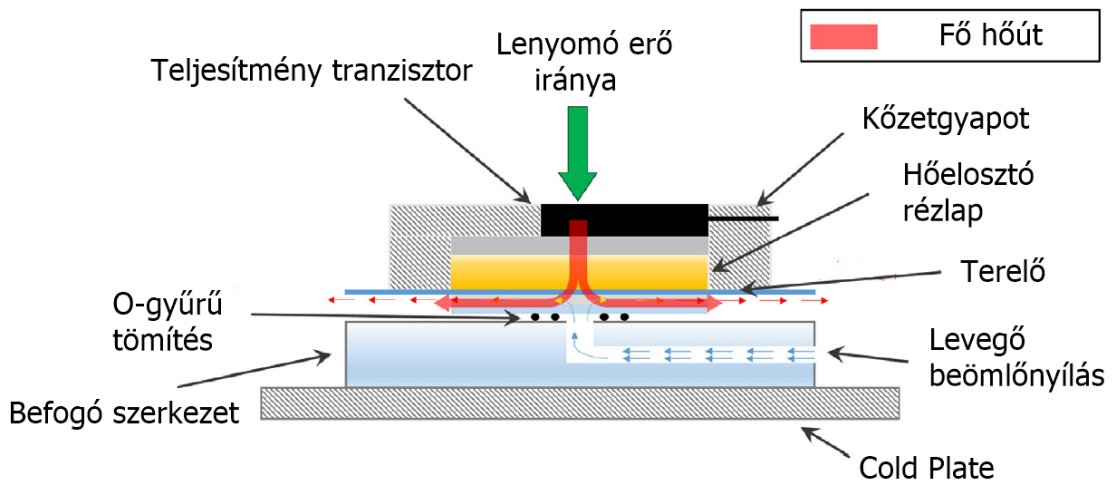
2.5. ábra: Példa egy kumulatív struktúra függvényre [4]

Tehát a teljesítmény-egységugrás hatására fellépő hőmérsékleti tranziens függvényből egy ún. kumulatív struktúrafüggvényt kaphatunk, amely az egydimenziós

hőútban található anyagok hőkapacitását és hőellenállását adja meg, amelyből a keresett érték számolható.

2.4 Korábbi minták termikus karakterizációja

A tanszéki kutatómunka során a korábbi eredmények alapján elkészített befogószerkezet sematikus metszeti rajza látható a 2.6. ábra szerint. A mérési elrendezésben a hűtőeszköz tetején egy hőelosztó rézlapra erősített disszipáló elem található, míg a hűtőeszköz alsó része egy cold plate re van helyezve, ami a termikus földkén szolgál. Ily módon a termikus tranziens méréssel az egy dimenziós hőút vonalában található minden egyes réteg termikus paramétere meghatározható.

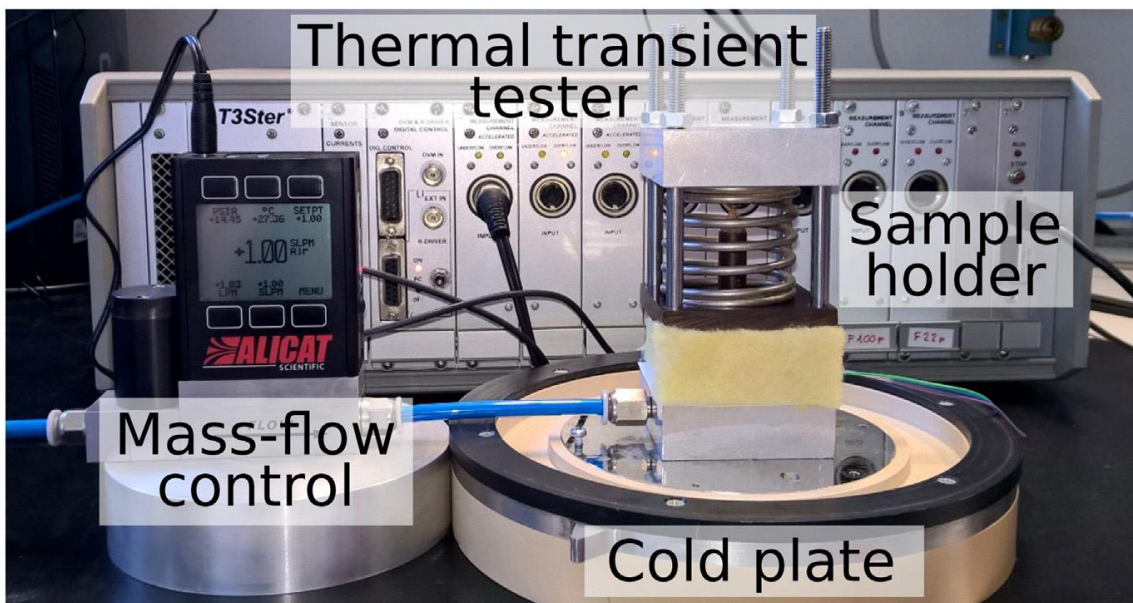


2.6. ábra A mérési összeállítás sematikus rajza [6]

A termikus tranziens mérés menete a következő: a mérendő eszközt egy teljesítménytranzisztorra erősítjük, majd az eszközön áramoltatott hűtőközeg áramlási sebességét beállítjuk egy meghatározott – a termikus tranziens felvétele alatt állandó – értékre és ezen az értéken tartjuk végig a mérés során. Állandósult állapotból indulva a rendszerre ismert értékű egységugrás-gerjesztést kapcsolunk, amelyet itt a teljesítménytranzisztor által adott kollektor-emitter feszültség és áram határoz meg. Ennek hatására a tranzisztor elkezd melegedni, és a hozzá kapcsolódó elemeket is elkezd melegíteni. Idővel a gerjesztés állandó értéken tartása mellett beáll egy újabb egyensúlyi állapot, amikor már a rendszer nem melegszik tovább, tehát egy kvázi állandósult állapot áll be. Mivel ismert a hőmérsékletváltozás és az alkalmazott teljesítményugrás nagysága, így a mérési összeállítás teljes (kumulatív) hőellenállása a mérési eredményekből könnyen számítható. A teljes tranziensválasz rögzítése teszi a mérést alkalmassá a

parciális termikus ellenállások meghatározására. Minket jelen esetben csakis a hűtőeszköz parciális-hőellenállása érdekel. Megismételve a mérést különböző gázáramlási sebességek mellett ez az érték változik [5], azaz a teljes hőellenállás a félvezető átmenet és a környezet között, a közeg áramlási sebesség növelésével csökken.

A teljesítménytranzisztor alkalmazása azért is célszerű, mert a bázis-emitter átmenet nyitófeszültségének változásából pontosan meg lehet határozni az eszköz hőmérsékletváltozását. [6] Így a tranzisztort nem csak disszipáló elemként, hanem hőmérsékletváltozás-érzékelőként is alkalmazzuk. A parciális hőellenállás meghatározására, a termikus tranziens görbe felvételére a T3Ster Termikus Tranziens Teszter berendezés alkalmas.

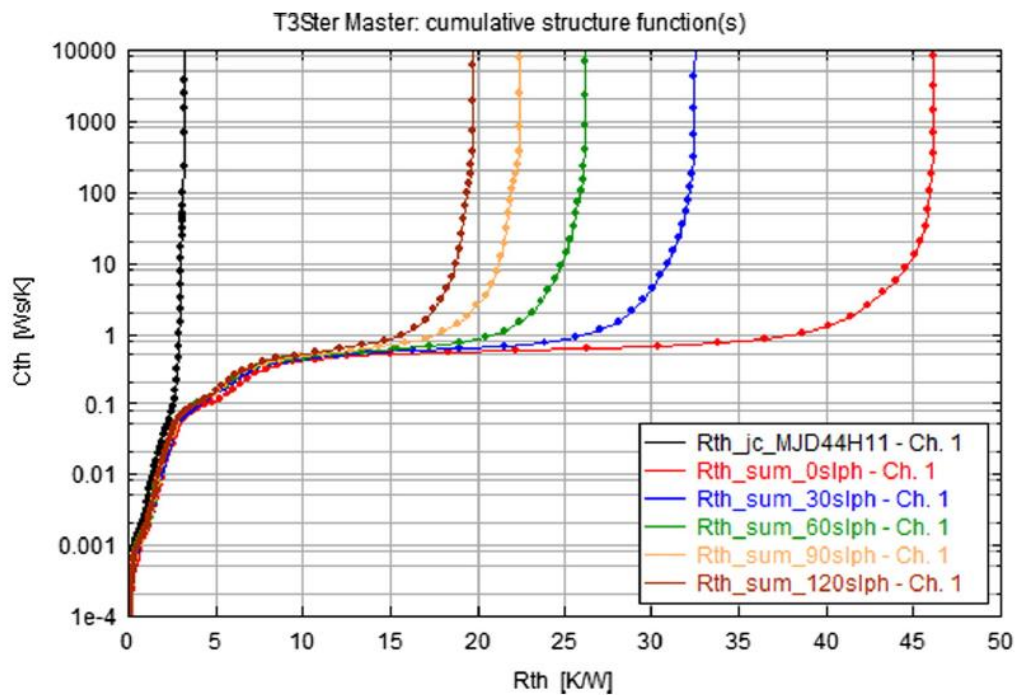


2.7. ábra: A realizált struktúra a termikus tranziens mérőhöz csatlakoztatva [6]

A tranzisztor által disszipált hő ideális esetben csak a hűtőeszközön keresztül képes távozni két fő irányba: a befogószerkezet alsó felülete felé a kettős gumi tömítőgyűrűn keresztül hővezetéssel (amely ez esetben parazitahőűtnak számít), valamint a hűtőbordán átáramoltatott gáz hatására kényszerített konvekcióval. Csekély hő távozik természetes konvekcióval is, amely hatása a külső környezet és a disszipációs forrás közé helyezett hőszigetelő közetgyapattal [7] elhanyagolható mértékűvé redukálható. A levegő-bevezetést a befogószerkezet alsó felében kialakított csatorna biztosítja, amely a mikroszerkezet közepén található 2mm átmérőjű lyukba irányítja a sűrített levegőt.

Az első mérést légáram nélkül elvégezve, a mérési összeállítás struktúrafüggvényét kapjuk. A kapott eredményből a mikrohűtőeszköz és a környezet

közötti parciális termikus ellenállás meghatározható. Az ezt követő mérések során a légáramot egy jól meghatározott értéken tartva meghatározható a struktúrafüggvényt. A méréseket 30, 60, 90 és 120 l/óra légáram mellett, a kapott struktúrafüggvényeket a 2.8. ábra szemlélteti. A vízszintes tengelyen a termikus ellenállás, a függőlegesen pedig a termikus kapacitás értéke látszik a félvezető átmenettől távolodva. [7]

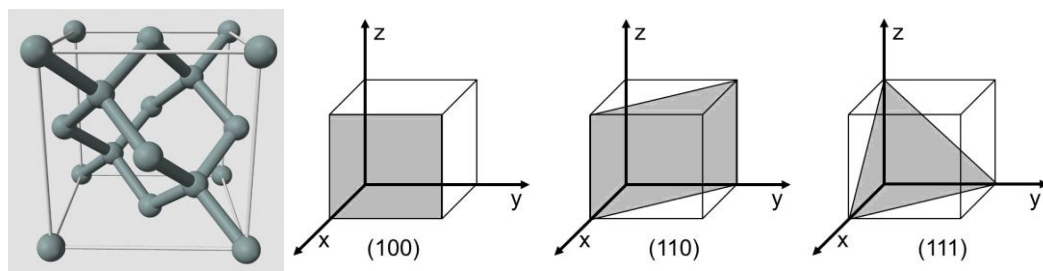


2.8. ábra: Termikus struktúrafüggvények különböző légáramok mellett (0-120 l/óra) [7]

Az eredményből a mikrohűtőborda termikus ellenállása közvetlenül leolvasható. A légáram nélküli mérésből származó mérési adatokat felhasználva a hűtőeszköz hővezetési együtthatója adott légáram mellett számítható, az áramlási paraméterek és a hővezetési együtthatók közötti kapcsolat pedig ezek felhasználásával meghatározható. A különböző méretű és kialakítású hűtőeszközök összehasonlíthatósága miatt a hővezetés helyett célszerűbb a hőátadási tényezőt megadni, amely megadja az egységnyi felületre vett hővezetést.

3 Az anizotróp marás

A mikromegmunkálási technológiák között két fő irányzatot lehet megkülönböztetni: a felületi és a tömbi megmunkálást. A felületi megmunkálás során egy alaphordozóra (mechanikai stabilitást biztosít) rétegeket választanak le, melyeken közbenső lépések sorozatával a felső réteg alól eltávolítják az alsó, úgy nevezett áldozati réteget, és így alakítják ki a kívánt szerkezetet. Ezzel szemben a tömbi megmunkálás során az alaphordozó izotróp vagy anizotróp marásával alakítják ki a kívánt alakzatot. Izotróp marás esetén a megmunkálandó anyagot minden irányban, orientációtól függetlenül egyforma sebességgel marjuk. Az anizotróp marás esetén viszont a különböző orientációjú kristálysíkokat eltérő sebességgel marjuk. Ezt 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.



3.1. ábra: A szilícium egységcella 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. Az anizotróp marási módszerek fontos paramétere az anizotrópiai hányados, ami a különböző síkok marási sebességének arányát határozza meg.

Egykristályos alapanyagnál a szelet orientációja $\langle 100 \rangle$, vagy $\langle 110 \rangle$ szokott lenni, 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.

3.1 Anizotróp marási módszerek és maszkolórétegek

Az egykristályos szilícium szelet anizotróp megmunkálására számos marási eljárás alkalmas. Ezek között megkülönböztetünk száraz fizikai és kémiai (dry etch), és nedves kémiai (wet etch) marást is:

Száraz marás:

- plazma marás,
- reaktív ion marás (RIE),
- mély reaktív ion marás (DRIE).

Nedves marás:

- ammónium-hidroxid (NH_4OH),
- kálium-hidroxid (KOH),
- nátrium-hidroxid (NaOH),
- hidrazin,
- etilén-diamin pirokatekol (EDP),
- tetrametil-ammónium-hidroxid (TMAH).

A szilíciumra vonatkozó anizotróp marási sebesség jelentősen függ a marószer típusától, az oldat koncentrációjától és a marószer hőmérsékletétől. A marási sebesség növelése érdekében a marószereket a szobahőmérsékletnél magasabb, tipikusan 60°C és 100°C közötti hőmérséklet tartományban használják. [8] A nedves kémiai marás egyik fő előnye, hogy a technológiai lépés alkalmazása úgy nevezett „batch production”, ami azt jelenti, hogy a marási folyamatot egyszerre több szeleten tudjuk végrehajtani.

Irányított struktúra kialakításához szükség van egy maszkolórétegre, ami biztosítja a szilícium lokális megmunkálását. Anizotróp marás során leggyakrabban alkalmazott maszkolóréteg a szilícium-dioxid (SiO_2) és a szilícium-nitrid (Si_3N_4). A maszkolóréteg kiválasztásánál figyelembe kell venni a réteg kialakítás módját, az adott marószerben a réteg maródási sebességét és a réteg megmunkálhatóságát is. A SiO_2 réteg egyszerűen megmunkálható fotolitográfiai és nedves kémiai műveletekkel. Ezzel szemben a Si_3N_4 réteg megmunkálásához gyakran fotolitográfia és CF_4/O_2 plazma együttes alkalmazása szükséges, ami további gépigényt jelent a technológiai sorban.

A RIE a szárazmarások közül a leghatékonyabb anizotróp marási eljárás, mely teljes mértékben tisztán fizikai marásnak mondható. Hátránya, hogy a maró ionok(Ar) porlasztási hozama hasonló különböző anyagokra, így a maszkolórétegekre kisebb a szelektivitása. Hátrányai közé tartozik továbbá, hogy nem CMOS kompatibilis, ugyanis a marás során jelentős mennyiségű elektron csapdát képes létrehozni a gate oxidban, valamint a felület töltődése miatt ronthatja a töltéshordozók élettartamát is. Ezen marási eljárás az EET tisztatéri laboratóriumában nem érhető el reaktív ionmaró berendezés hiányában.

A KOH erősen anizotróp jelleggel marja a szilíciumot. Rövidebb idejű marásokhoz szilícium-dioxid, hosszabb idejű marásokhoz szilícium-nitrid rétegek maszkként használhatóak. Alkalmazásának hátrányai közé tartozik, hogy marás közben H₂ buborékok keletkeznek, amik egyenetlenné teszik a marást, valamint alkáli fémionokat is tartalmaz, ami nem teszi kompatibilissé MOS technológiával.

Az EDP (ethylenediamine pyrocatechol) gyengébb anizotrópiát mutat KOH-dal szemben, viszont fémionoktól mentes. Ennek ellenére használata veszélyes, mivel pirokatekolt tartalmaz, ami nagymértékben mérgező és mutagén, tehát használata nagy körültekintést és óvatosságot igényel.

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°C alatt, így töményebb oldatok esetén lehetőség nyílik 100°C-nál magasabb hőmérsékletű felhasználásra is. [8]

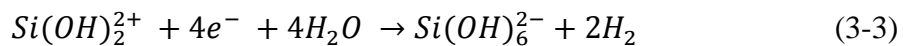
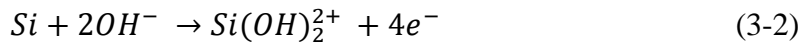
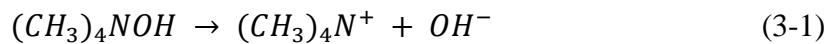
3.2 A TMAH marási mechanizmusa

A feladatom elvégzéséhez a TMAH marószeret választottam 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,

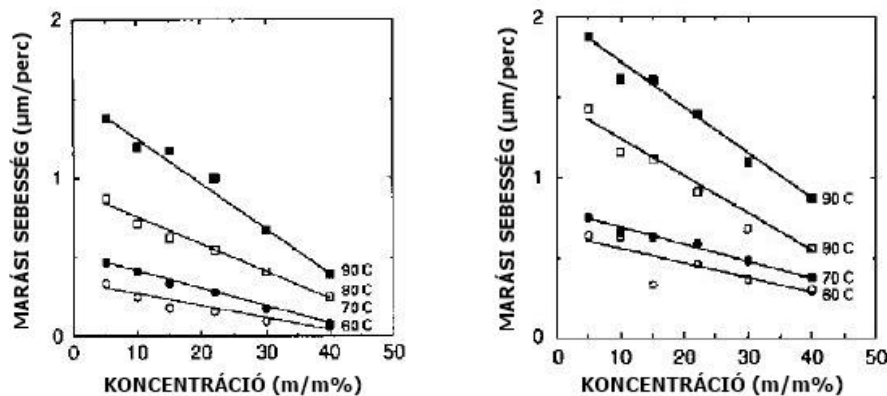
- alacsony toxicitás és könnyű kezelhetőség.

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 (3-1). A (3-2) 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 (3-3), melynek végtermékei közt szerepel a hidrogén. [11]

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 3.2-es ábra alapján látható, hogy a marási sebesség az [110] -ás irányban gyorsabb az [100] -ás irányhoz képest. [10]



3.2. ábra: Marási sebességek [100], illetve [110] irányban a TMAH koncentráció függvényében [10]

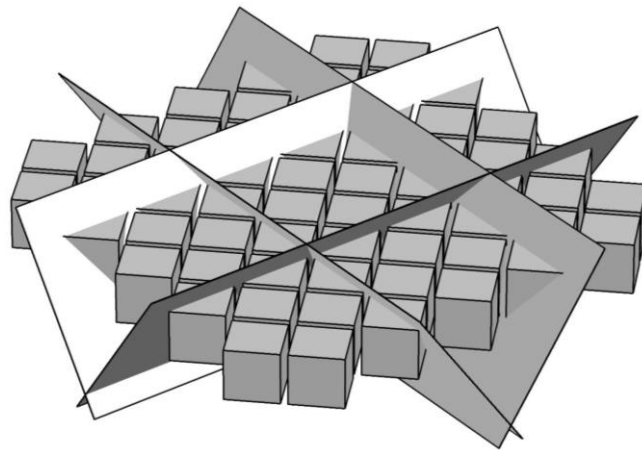
A marási sebességet további tényezők is befolyásolhatják: a marószer adalékanyagai, a marási hőmérséklet, a felület minősége és a felhasznált szelet típusa. n-típusú szelet esetén a marási sebesség kissé megnövekszik a p-típusú szelethez képest. A koncentráció növekedésével (>20 m/m%) a marási sebesség lecsökken, viszont simább felületek érhetők el. Egyes források szerint a felületek egyenletessége és a marási

sebesség ammónium-peroxo-diszulfát (AP) adalékanyag hozzáadásával tovább növelhető, mellyel akár 1,52 $\mu\text{m}/\text{perc}$ is elérhető. [8]

3.3 (100) felületi orientáltságú Si tömbi marása

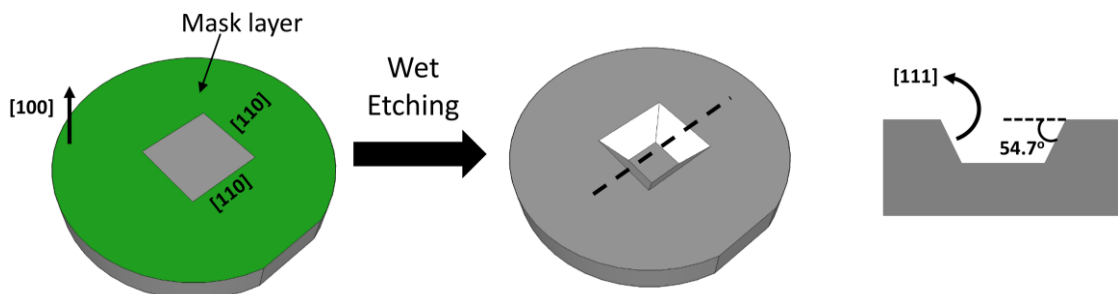
A szilícium tömbi megmunkálása alapvető fontosságú eljárás a MEMS technológiában. Anizotrop marással árkot vagy üreget valamilyen maszkolórétegbe (SiO_2 , Si_3N_4) nyitott ablak segítségével lehet kialakítani.

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.



3.3. ábra: A négy darab (111) -es sík az (100) -ás felületen [12]

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



3.4. ábra:(100)-ás szelet marási profilja [13]

A kialakult üreg oldalfala $54,74^\circ$ -os szöveget 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).

Ilyen TMAH nedves kémiai marási technológiával kialakított integrált mikroméretű hűtőcsatornák karakterizációja során, – melyek keresztmetszete trapéz alakú – bizonyították, hogy a gázáram növelésével a lamináris áramlás turbulenssé változik. [9]

Abban az esetben, amennyiben egy integrált áramkört tartalmazó szelet hátoldalára alakítanak ki ilyen csatornákat, beszélhetünk ún. integrált mikroméretű eszközökről, melyek hűtőközege lehet gáz vagy folyadék.

A 2.4 fejezetben bemutatott mérőrendszerben ezidáig a disszipáló forrást egy teljesítménytranzisztor jelentette, mely egy hőelosztón keresztül a mérendő hűtőeszközhöz volt erősítve. Karakterizáció során a struktúrafüggvény tartalmazta a tranzisztor tokjának és a rézlapnak a parciális hőellenállását.

Egyértelmű volt, hogy a kutatómunkába bekapcsolódva a feladatom, olyan aktív integrált félvezetőeszközök megtervezése és megvalósítása, melyeket mikroméretű hűtőcsatornákkal együttesen kialakítva, lehetővé válik a külső disszipáló elem nélküli, közvetlen termikus gerjesztés és hőmérsékleti gradiens kialakítása, magának az integrált áramkörnek a felületén.

Feladatom fő célja az, hogy a szilícium szeletekre egy technológiai soron belül hozzak létre hődisszipáló elemeket, melyek legegyszerűbb realizációja a dióda, valamint ezekkel ellentétes oldalra, CMOS kompatibilis anizotróp marással készült mikroméretű hűtőcsatornákat alakítsak ki. Ezzel lehetővé válik az integrált mikroméretű hűtőbordák hőátadási folyamatainak vizsgálata és karakterizálása.

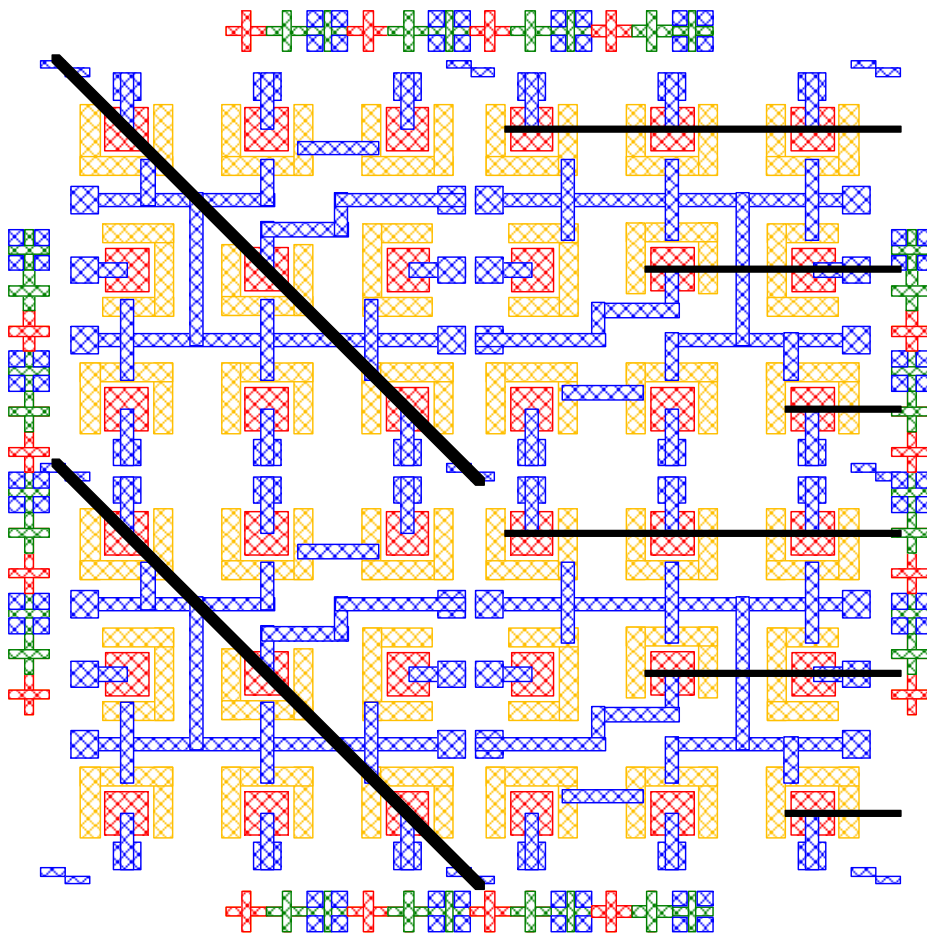
A mikroméretű hűtőcsatornákat tartalmazó integrált eszköz tervezését, gyártását és minősítését dolgozatom következő fejezeteiben ismertetem.

4 Az új eszköz megtervezése

Egy ilyen eszköz legyártásához létrehozásához, elengedhetetlen az eszköz geometriáinak és a gyártáshoz használt technológiák pontos megtervezése.






Az új integrált eszköz egy $15 \times 15 \text{ cm}^2$ felületű chipen 9 diódát tartalmaz mátrixos, 3×3 -as elrendezésben. Az eszközöket 2 inches n-típusú szeleten valósítottam meg, melyre négy diódamátrix fér rá, két-két különböző geometriájú mikroméretű csatornarajzolatokkal. Ezek közül az egyik egy átlósan elhelyezett $400 \mu\text{m}$ széles csatornamintázat, valamint egy három egymás alatt rövidülő párhuzamos $200 \mu\text{m}$ széles csatornamintázatból álló struktúra. A szelet szélein találhatóak még az illesztést segítő kereszt típusú illesztőábrák, valamint a chippek sarkaiban a fűrészelést segítő rajzolatok.

Az elkészített layoutok rajzolatát a CleWin nevű szoftver segítségével készítettem el. A CleWin a PhoeniX BV nevű szoftverfejlesztő cég tervezőprogramja, melyet az MTA EK MFA kutatóintézete MEMS valamint CMOS struktúrák maszkjainak tervezéséhez használ.

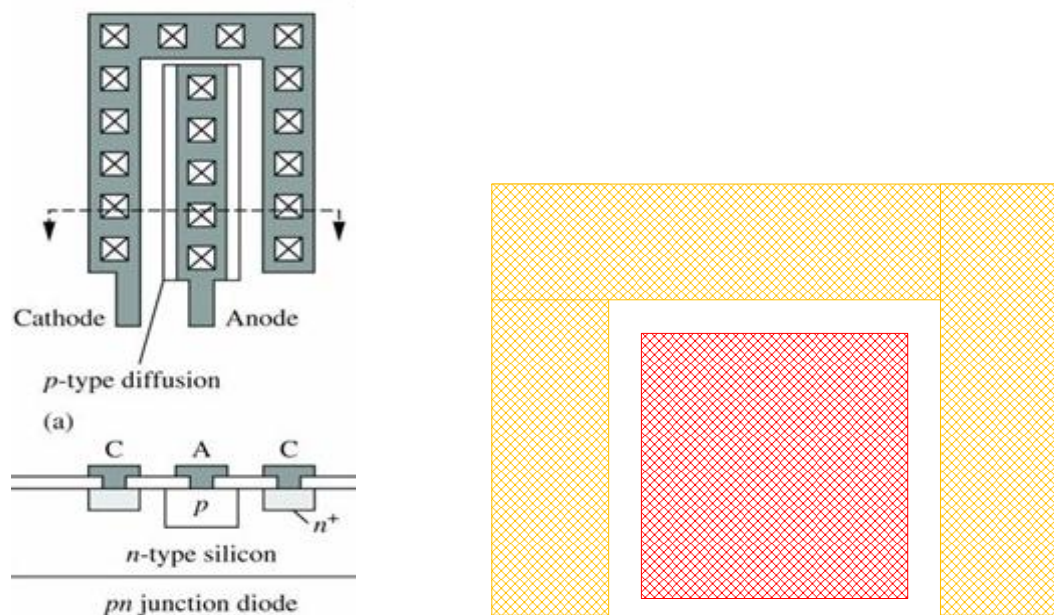


4.1. ábra: A szeleten kialakítandó eszközök layoutja

A chipet 5 maszkos technológiával terveztem, ahol az egyes maszkok nevei és színei, a gyártási folyamatban történő felhasználás sorrendjében a következők:

-  **1. – N+DIFF:** n+ diffúziós réteg maszk
-  **2. – PDIFF:** p diffúziós réteg maszk
-  **3.– TMAH:** TMAH marás maszkja
-  **4. – CONT:** Kontaktus ablak maszk
-  **5. – METAL:** A fémezési réteg maszkja

Az eszközön található dióda struktúra egy általános pn átmenetes dióda layout, amit a 4.2. ábra is mutat. Középen egy négyzet alakú p diffúzió az anód (Anode) szerepét látja el. A körülötte található U alakú mintázat az n+ diffúziós katód (Cathode), ami a megfelelő fém-félvezető között kialakuló ohmikus kontaktus létrejöttéért is felel.



4.2. ábra: A pn átmenetes dióda. Balra egy általános struktúra [14], jobbra az általam tervezett struktúra

4.1 A diffúziós lépések megtervezése

A diffúziós lépéseket a tanszéki tisztatéri laboratóriumban korábban létrehozott stabil technológiát biztosító receptek segítségével és különböző szimulációk [15] vizsgálatával terveztem. A diffúziós eljárások során mindig két lépésben történik meg a kívánt diffúziós profil kialakítása, melyet a mért rétegellenállással és az átmenet mélységével jellemezhetünk.

A diffúzió első lépése (leválasztás, pre-deposition) során az adalékanyag leválasztása történik a hordozó felületére, amelyből a leválasztás során egy kis mélységű ($<1 \mu\text{m}$), igen erősen adalékolt tartomány alakul ki a szilícium szelet felületközeli tartományában.

Ezt egy második diffúziós lépés követi (behajtás, drive-in), ennek során a már leválasztott anyag szolgál forrásként. Ez szétdiffundálva alakul ki a kívánt adalékprofil.

A laboratóriumban jelenleg kétféle adalékanyagot, az U alakú n^+ diffúzióhoz foszfort, a négyzet alakú p típusú adalékolás kialakításához bórt használok.

A foszfor diffúzióra P8545 spin-on forrást alkalmaztam. A szeletre centrifugálással felvitt adalékanyagot beszárítás után magas hőmérsékleten diffúziós forrásként használható. Ebben az esetben a négyzetes ellenállás tipikus értékei $1-2 \Omega/\square$ -tól egészen $40 \Omega/\square$ -ig változhatnak az alapanyag és a beállításoktól függően. A leválasztás $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleten történik 20 percig, a behajtás hőmérséklete $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 35 percig, mely után a szimulátor szerint a felületi adalékkoncentráció száma 1×10^{20} .

A bór diffúzió esetén Boron-Plus tárcsák (Techneglas, USA) alkalmazásával történik a leválasztás. A leválasztás $990 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleten 30 percig történik, a behajtás hőmérséklete $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, ideje pedig 45 perc. Az alkalmazott $1-10 \Omega\text{cm}$ fajlagos ellenállású alapanyag esetén a behajtás után a szeleten várható négyzetes ellenállás jellemzően, a technológia inhomogenitás miatt $60-80 \Omega/\square$ körüli. A szimulátor szerint a várható adalékkoncentráció a felületen 5×10^{19} . A korábbi kísérletek alapján megállapítottam, hogy a szelet közepén az adalékolás erősebb és a szélek felé gyengül.

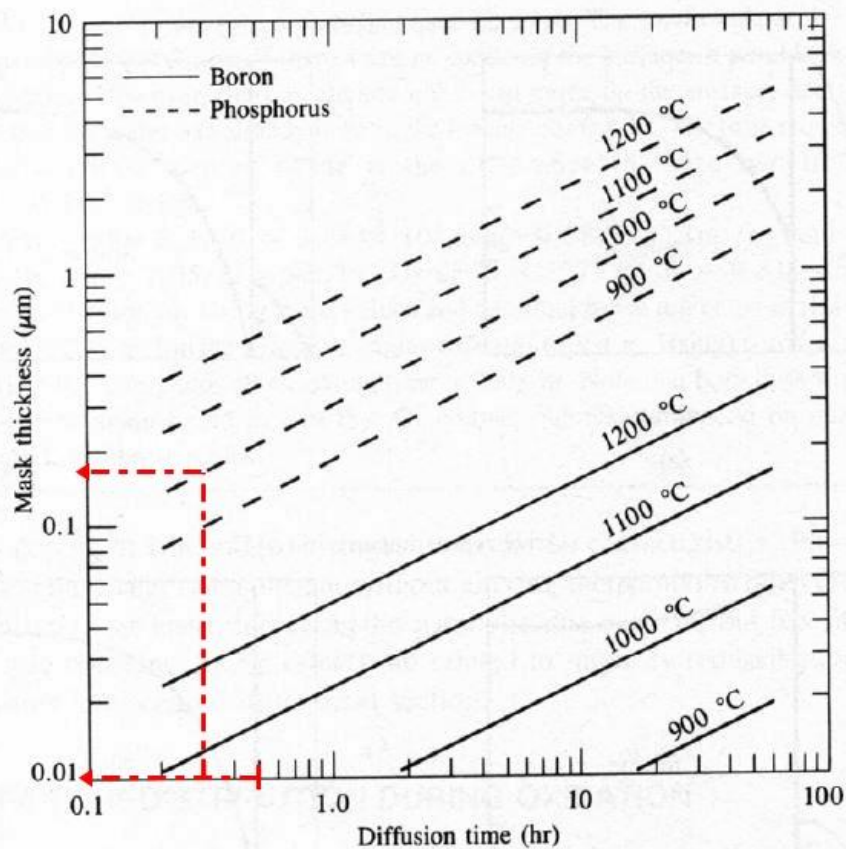
A tervezéskor figyelni kellett, hogy a túladalékolás következtében (10^{20} felett), mely többnyire az n^+ réteg kialakításakor jelent kockázatot, a szilícium felületén ún. dead layer keletkezhet, melyben az adalékkoncentráció, azaz az adalékatomok száma olyan magas, hogy a töltéshordozók élettartama úgy lecsökken, hogy még azelőtt rekombinálnának, hogy elérnék a pn átmenet kiürített rétegét. Mivel kevés benne mozgékony töltéshordozó, így a felület ellenállása nagymértékben megnő és vezetéképtelenné válik.

4.2 Az oxidációs folyamatok tervezése

Szilícium dioxid(SiO_2) létrehozására a tisztatéri laboratóriumban, száraz termikus oxidációval van lehetőségünk, általában $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ -on, melynek során jó minőségű réteg

keletkezik, azonban a réteg keletkezése lassan megy végbe. A kívánt réteg vastagságát az oxidációs idő függvényében tudjuk befolyásolni, melyeket oxidációs szimulátorokkal határoztam meg. Gyártás során a technológiában három esetben lesz szükség szilícium-dioxid maszkoló rétegre, mely mindig az azt követő technológiai lépés maszkrétege. Két alkalommal – a diffúziós processzek során –, ahol az oxid réteg a foszfor, valamint a bór adalékolás ellen véd a nem kívánt helyeken.

A foszfordiffúzió ellen a maszkoló oxid vastagsága mindig nagyobb, mint a bór diffúzió ellen, mivel a foszfor SiO_2 -re vonatkoztatott diffúziós együtthatója majdnem két nagyságrenddel nagyobb a bórénál. A 4.3. ábra szerinti grafikon alapján lehet a szükséges oxidréteg vastagságát közelíteni, mely esetünkben 200 nanométert jelent. A kísérleteink során a foszfordiffúzió ideje 20 perc, a leválasztási hőmérséklet 1000°C . Az itt [16] található kalkulátoros szimulátor segítségével meg lehet állapítani a kívánt vastagság és technológiai hőmérséklet függvényében a létrehozandó SiO_2 réteg oxidációs idejét. 200nm-es száraz oxidhoz szükséges technológiai idő 2 óra 30 perc 1100°C -on.



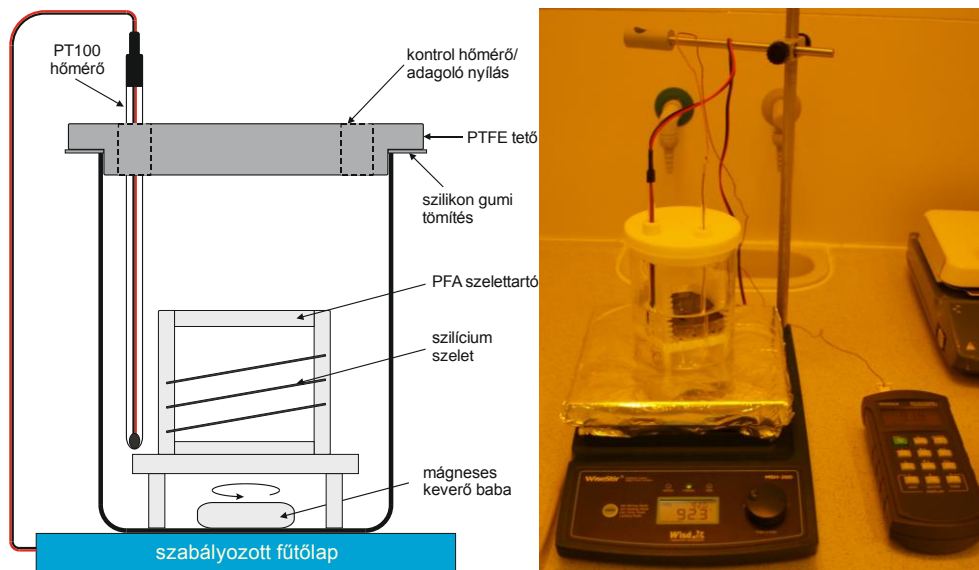
4.3. ábra: A foszfor- és a bórdiffúzióhoz szükséges rétegvastagságok a diffúzió idejének függvényében, a technológia hőmérsékletével paraméterezve

A bórdiffúzió maszkolórétegét a foszforbehajtással egy technológiai lépésben végezzük, mivel a behajtás oxigén áramban 1100 °C -on történik. A 30 perces bór diffúzióhoz szükséges oxid vastagsága a grafikon alapján 10 nm alatti tartományba esik, így a létrejövő vastagságot a behajtás ideje határozza meg. Ez a kalkulátor [17] szerint 67 nm-re adódik.

A harmadik esetben a szilícium TMAH marása során alkalmazzuk maszkoló réteggént. Dr. Földváry-Bándy Enikő kísérletei alapján [8] a TMAH marószernagy szelektivitást mutat a SiO₂ -vel szemben. marási sebessége mindössze 17,5 nm/óra. Az irodalmi és kísérleti értékekre támaszkodva a csatorna marás során várhatóan 20nm/h száraz SiO₂ szükséges. 75 perces marási idővel számolva, mely során az elért csatornamélység 100µm, 25nm száraz SiO₂ maszkoló rétegre van szükség. A fémezési ábrák illesztéséhez színes, látható oxid kell maradjon a felületen, tehát több mint 60nm. A réteg kialakítását szintén a bórbehajtási folyamat során alakítjuk, így a 45 percesre tervezett behajtási idő alatt a szimulátor [17] szerint ~100nm SiO₂ várható. Ez mindkét kritériumnál nagyobb érték, így megfelelő lesz a maszkoláshoz.

4.3 A TMAH marás tervezése

A marási paramétereket Dr. Földváry-Bándy Enikő [8] kutatásainak eredményei alapján állítottam be. Ezek alapján 5m/m% TMAH vizes oldatát használom 2g/l/h AP adalékanyaggal. A marást 92 °C-on végezem 200 fordulat/perces keverés mellett, a minták összehasonlíthatósága érdekében. Az adott recepttel sima felületek és 1,5 µm/perc marási sebesség érhető el. A cél körülbelül 100 µm mélységű csatornák kialakítása, így a marási sebességből visszszámolva a mintákat 70 perces marási idővel terveztem.

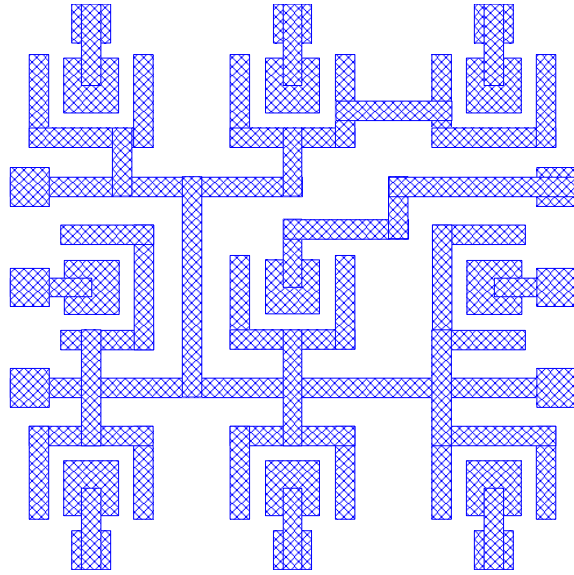


4.4. ábra: A marási elrendezés [8] és egy marás közbeni felvétel

A fotolitográfia és a maszkgyártási technológia minőségének pontatlanságából eredően már a marás megkezdése előtt számítottam rá, hogy az alámaródás miatt a kialakítandó alkatatok sarkai eltérő geometriájúak lesznek a megtervezett maszkon található mintákhoz képest. Fontos megjegyezni, hogy a TMAH alapú marószereket az iparban használják alumínium rétegek megmunkálására is, tehát az anizotróp csatornamarás minden képpen meg kell előzze az alumínium fémréteg kialakításának technológiáját.

4.4 A fémezés és kontaktusok kialakítása

A termikus karakterizációk végrehajtásához az integrált eszközünket egy hordozóra kell rögzítenünk, és az elektromos kapcsolatokat huzalkötéssel kell kialakítanunk. Ehhez elengedhetetlen egy könnyen hozzáférhető, megfelelő elektromos kapcsolatok és kivezetések megvalósítása a fémrétegen, mely a 4.5. ábra szerint van kialakítva.



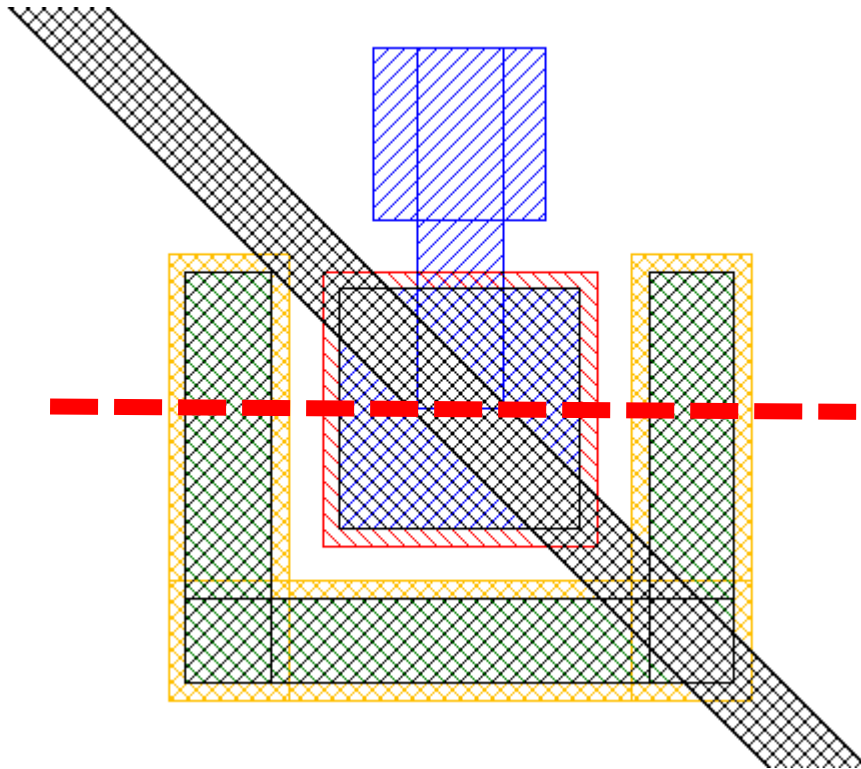
4.5. ábra: A fémezés az összekötött katódokkal és kivezetések

Az eszköz fémrétegét alumínium gőzölésével lehetséges létrehozni. A köthető kontaktuspadek a chip szélein helyezkednek el. A diódák négyzet alakú anódjai egyenként rendelkeznek külön kivezetésekkel. Az U-alakú katódokat, a chipen belül egy közös vezetékhalózat köti össze, aminek – akár egy modern processzor földkivezetéseihez hasonlóan – több hozzávetése is van.

5 Az integrált eszköz technológiai utasítása

A megtervezett eszköz elkészítéséhez szükség van egy jól definiált technológiai folyamat pontos paramétereit tartalmazó leírására, mellyel biztosítható a gyártás reprodukálhatósága. Az előző fejezetben ismertetett megfontolások alapján a chip elkészítéséhez a következő technológiai lépéssort állítottam össze.

A gyártás, technológiai lépések sorozatából áll. Minden fő lépés egy adott maszkot igényel, mely meghatározza az adott rétegen kialakított mintázatok geometriáját. A gyártás során használt egyes rétegekhez tartozó maszkok, dolgozatom 4. fejezetében találhatóak. A technológiai lépéssor részletes leírását egy dióda metszetén szemléltetem.



5.1. ábra: A dióda és a mikrocsonna

Egy réteg szelektív megmunkálására a szeleten litográfiai folyamatot alkalmazunk. Az adott réteget leválasztás után pozitív fotorezisztrel vonjuk be, majd a 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 részekről eltávolítjuk egy TMAH alapú lúgos vegyülettel. A következő lépés során egy másik vegyülettel lemarjuk a leválasztott mintázandó réteget azokról a

helyekről, ahol nem védi a fotoreziszt lakk. Végül a maradék rezisztet is leoldjuk a szelet felületéről és így megkapjuk a rétegen kívánt mintázatot.

Az integrált eszköz alapanyagának tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

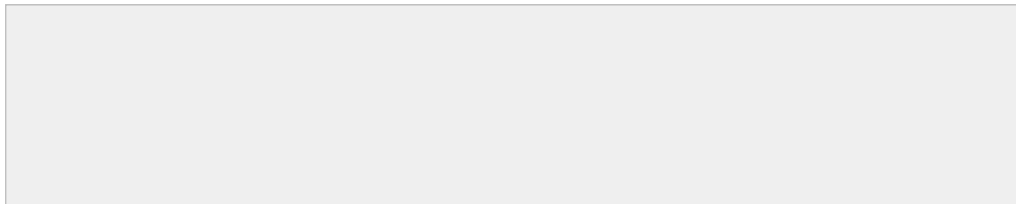
1. táblázat: Az alapanyag tulajdonságai

Si-Mat Cz- egykristályos szilícium szelet			
Típus	N-típusú (foszfor)	Átmérő	50.8 mm
Orientáció	<100> +/- 5°	Vastagság	225-275 μm
Polírozás	Double Side Polished (DSP)	Fajlagos ellenállás	1-10 Ωcm

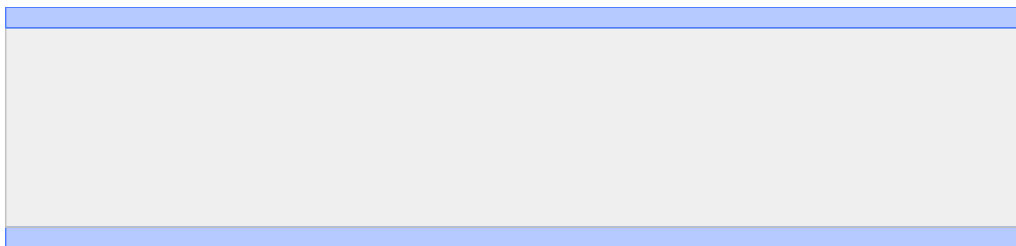
A gyártás során használt technológiai folyamatok lépéssorozata a következő:

Tisztítás és foszfordiffúzió ellen maszkoló oxid növesztése

1. Kémiai RCA (Radio Corporation of America) 1:2 tisztítással a szelet felületéről eltávolítjuk a szennyeződések

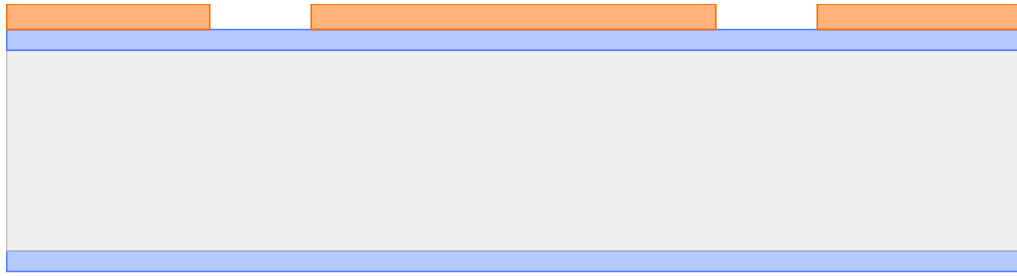


2. Száraz oxidációval 200 nm maszkoló oxid növesztése a foszfor diffúzió ellen, T=1100, t=180 perc

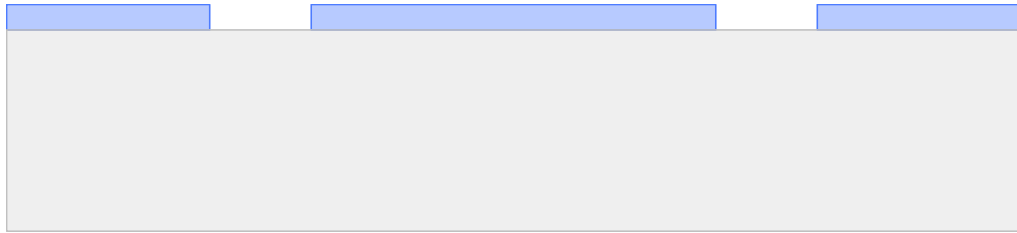


Foszfor diffúziós ablaknyitás és foszfor diffúzió Spin-On-Dopant (SOD) forrásból

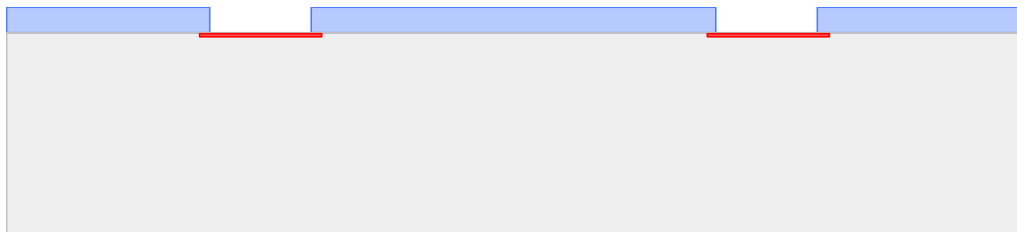
3. AZ1518 fotoreziszt megvilágítása az **N+DIFF** maszknak megfelelően. Előhívás AZ726 MIF előhívóban, t= 30 s.



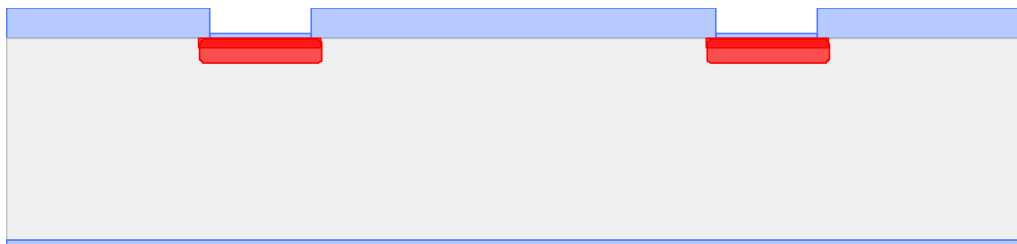
4. Ablakokból SiO₂ eltávolítása BOE (Buffered Oxide Etch) oxidmaróban, t= 180 s.



5. Fotoreziszt eltávolítása, kémiai tisztítás
6. Foszfor leválasztás T=1000°C, t=20 perc.

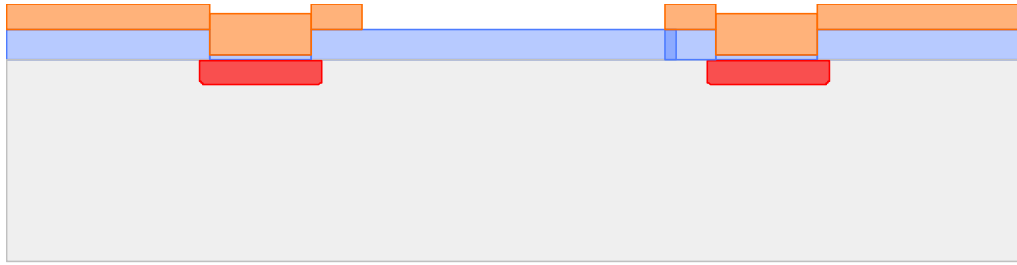


7. Foszfor behajtás és maszkoló oxid növesztése a bór diffúzió ellen. T=1100°C-on, t=35perc, 100% O₂.

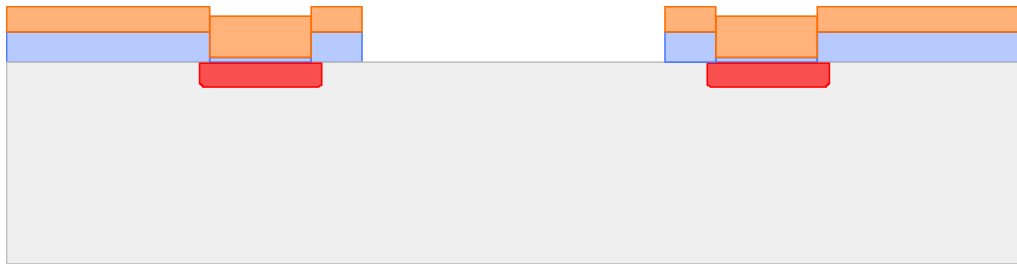


Ablaknyitás bór diffúzióhoz és tárcsás bór diffúzió

8. A fotoreziszt megvilágítása a **BDIFF** maszk alapján. Előhívás AZ726 MIF hívóban, t= 30s.

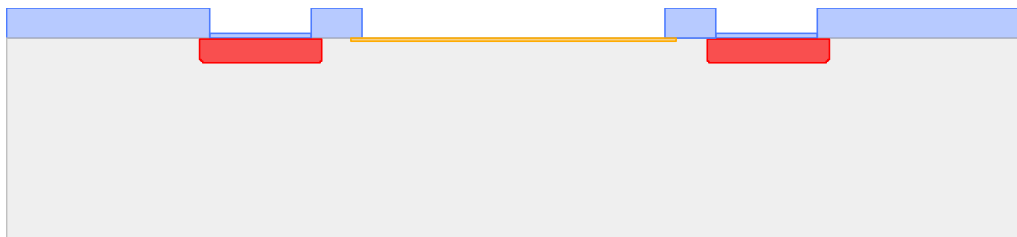


9. Ablakokból SiO₂ eltávolítása BOE oxidmaróban (oxidvastagság ~230nm), t=180 sec.

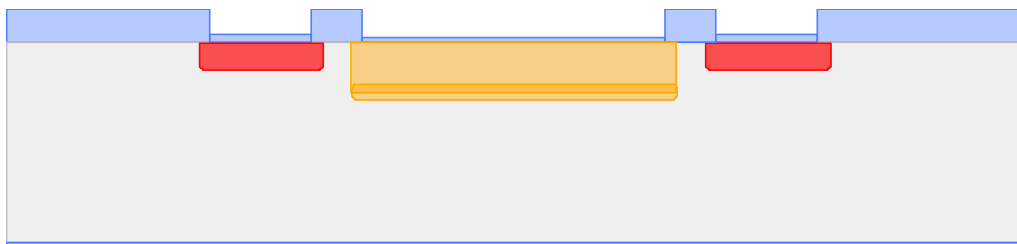


10. Fotoreziszt eltávolítása, kémiai tisztítás:

11. Bór leválasztás, T=990°C, t=30 perc, 100% N₂ gázban.



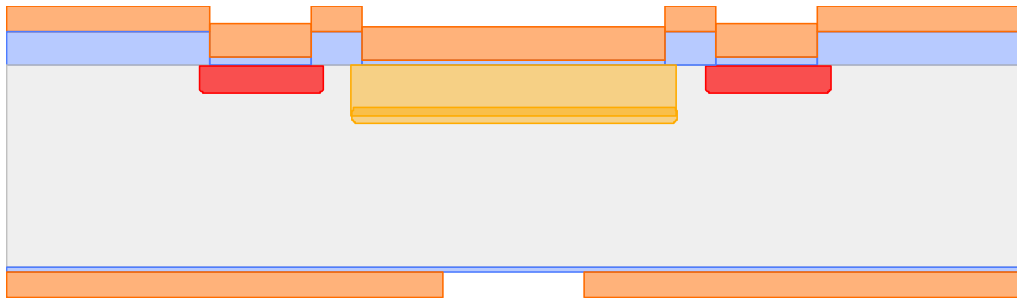
12. Bór behajtása és TMAH csatornamaráshoz/fémezéshez oxid növesztés T=1100°C, t=45 perc, 100% O₂ gázban



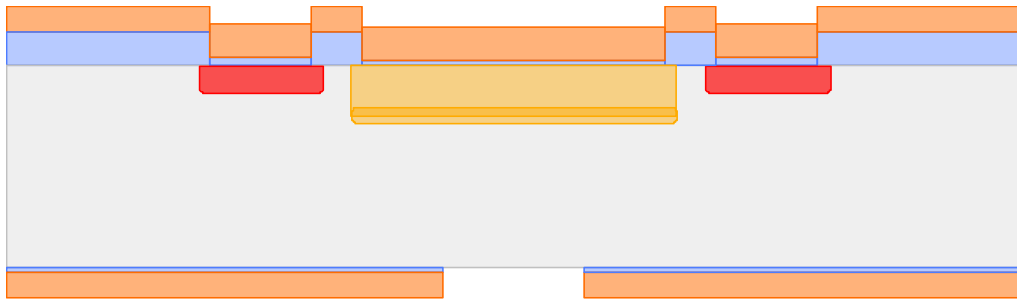
Mikrocsatornák marása

13. Fotoreziszt felvitele és beégetése az előoldalra. T=115°C-on, t=50s. (Aktív eszközök védelme)

14. Fotoreziszt felvitele a hátoldalra, majd megvilágítás és előhívás a **TMAH** maszk szerint.



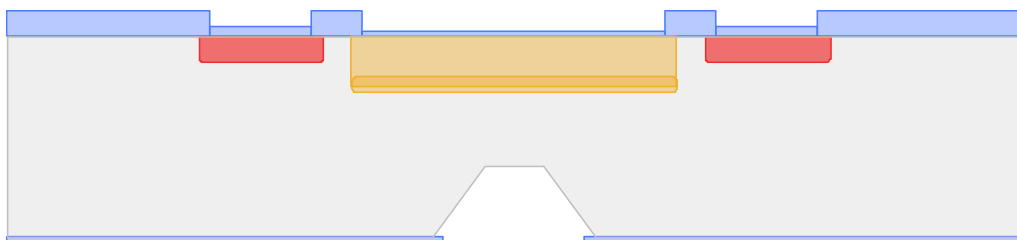
15. Oxidmarás BOE-ban, marás ideje függ az oxidvastagságtól (~82nm), t=1 perc).



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

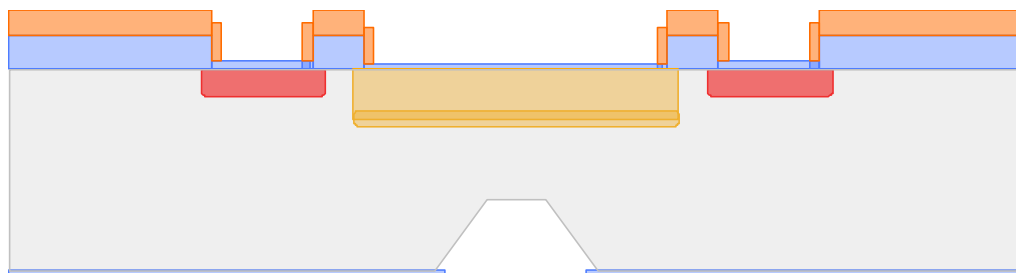
17. TMAH marás 5%-os oldatban, l=375g (300g H₂O + 75g 25%-os TMAH). A marás T=92°C, 200 RPM történik, az oldat hőmérsékletét külső hőmérővel kell ellenőrizni, hogy 92°C legyen. Marási idő t=75 perc.

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

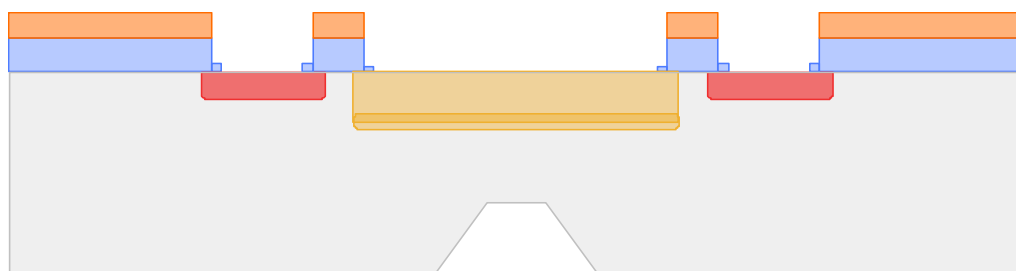


Kontaktusok kialakítása és Alumínium fémezés

19. A szelet felületére felvitt rezisztet a **CONT** maszknak megfelelően hívjuk elő. Előhívás AZ726 MIF hívóban, t= 30s.

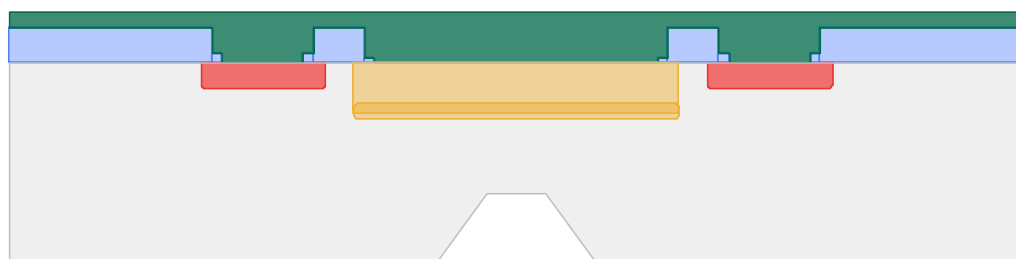


20. Ablakokból SiO₂ eltávolítása BOE oxidmaróban (oxidvastagság <50nm-nél kevesebb), t=40s.

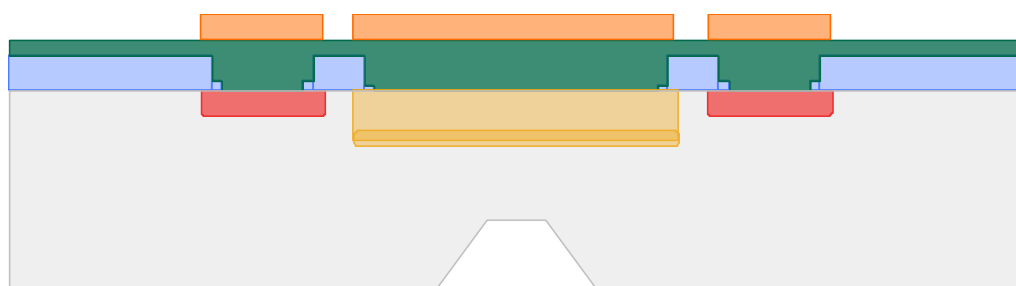


21. Fotoreziszt eltávolítása.

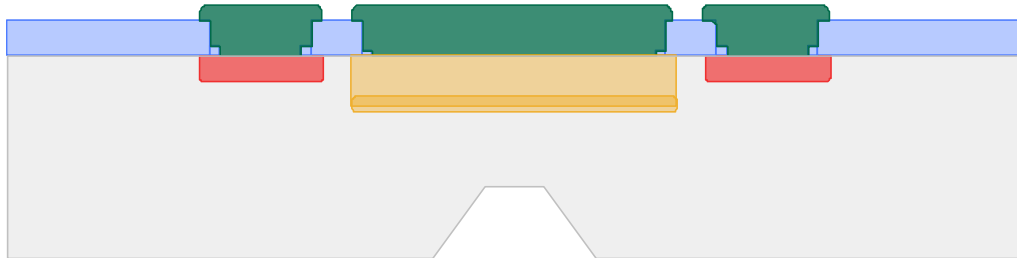
22. Alumínium gőzölés 2-2,5 nm rétegnövekedési sebességgel. ~210-280 nm rétegvastagság.



23. Megvilágítás a **METAL** elnevezésű maszk szerint. Előhívás AZ726 MIF hívóban, t= 30s.



24. Al marószerben (összetétel: 160ml H₃PO₄ + 10ml HNO₃) a szeletek egyenkénti marása amíg szemmel láthatóan lemaródik az Al a felületről; kis túlmarás (20 sec) alkalmazása a biztos Al réteg eltávolítása érdekében.



25. Al maró leöblítése és lakk eltávolítása a felületről aceton és alkoholos öblítéssel.
26. Minták hőkezelése $T=450^{\circ}\text{C}$, $t=30$ perc, 100% N_2 gázban.
27. Minták fűrészélése

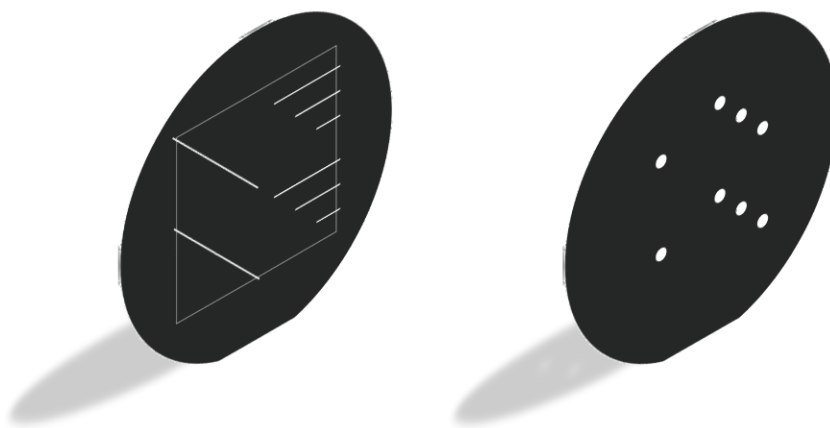
6 A csatornák lezárása

Ahhoz, hogy az elkészített mintáinkon kvalitatív méréseket végezhessünk szükségünk van a csatornák lezárására. A korábbi minták lezárását eddig egy speciális Borofloat 33 üveggel oldották meg, melyet anódikus bondolással rögzítettek a szilícium lapkához. [18] Az új minták esetén célszerű lenne, hogy a lezárásra használt anyag termikus paraméterei megegyezzenek a hordozó anyagával. Az 2. táblázat alapján is látszik, hogy a Borofloat üveg és a szilícium lineáris hőtágulási együtthatója közel azonos, azonban a szilícium hővezetési tényezője két nagyságrenddel nagyobb a Borofloat üvegénél.

2. táblázat: A borofloat üveg és a szilícium termikus tulajdonságai

	Lineáris hőtágulási együttható, α $\left[10^{-6} \times \frac{1}{K}\right]$	Hővezetési tényező, λ $\left[\frac{W}{m \times K}\right]$
Borofloat 33 üveg	3,25	1,08
Szilícium	2,5-2,6	144 – 149

A lezárást célszerű tehát szintén az eszközök alapanyagából, azaz szilíciumból készíteni. Az előző megfontolások alapján egy oldalon polírozott szilícium szeletek TMAH nedveskémiai marásával elkészítettem a minták lezárására szolgáló szintén 15×15 cm² felületű chipeket, mely egy, illetve három darab 2mm átmérőjű beömlőnyílást tartalmaz a csatornák típusaihoz igazodva, melyeket a 6.1. ábra szemléltet.



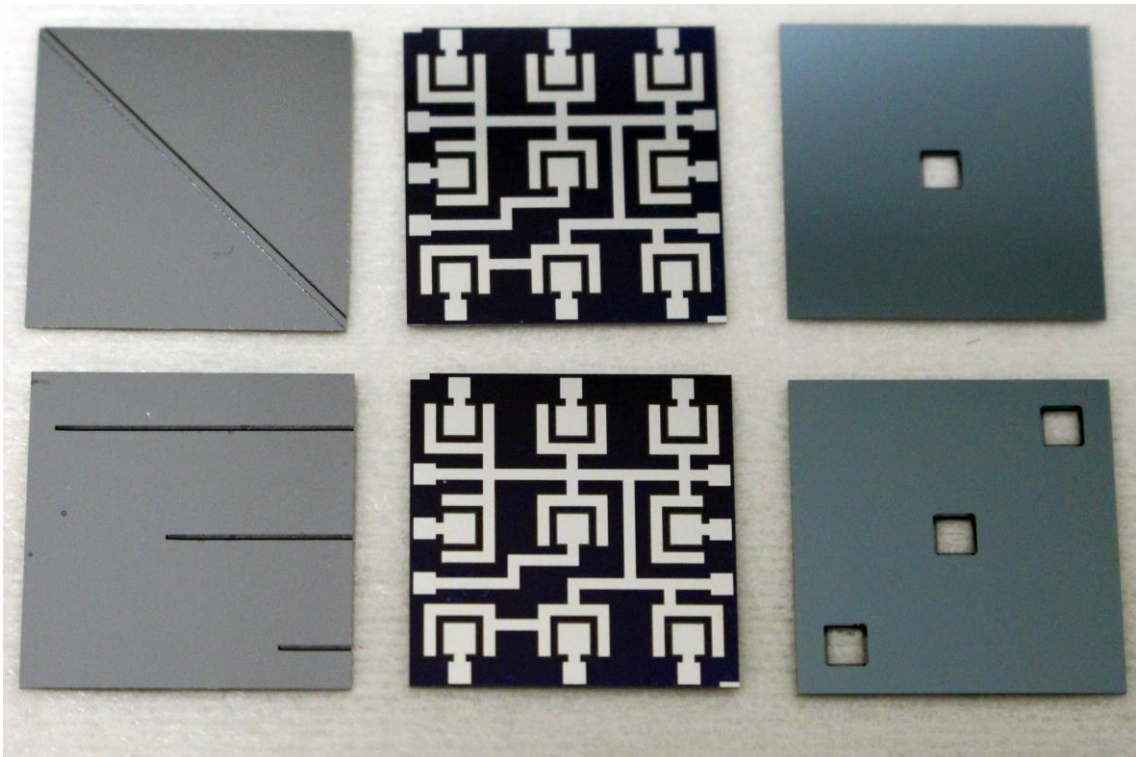
6.1. ábra: A csatornák és a hozzájuk tartozó beömlő nyílások

A marás menete és paraméterei megegyeznek a csatornák marásánál használt technológiával, ugyanakkor a marási idő a szilícium szelet teljes átlukadásáig tart, ami függ a felhasznált szelet vastagságától, ami a minták elkészítése esetében a kb. 300 μm vastag szilícium szelet átmarása 3 óra 35 perc volt.

Szilícium-szilícium összekötése esetén is beszélhetünk anódikus bondolásról, a csatornákat tartalmazó polírozott felületet és a beömlő nyílások polírozott felületeit egymással szembe fordítva, azonban a technológia magas hőmérsékletet igényel, melynek következtében az alumínium rétegünk esetlegesen sérülhet. Másik lehetőség, hogy a mintákat a mérőrendszerbe helyezés előtt összeillesztjük és széleire kis mennyiségű ciano-akrilát alapú ragasztóanyagot viszünk fel. Ez arra szolgál, hogy a behelyezés során a lezáró elemek és a mikrocsatornás mintáink ne távolodjanak el egymástól. A szerkezetbe helyezés után ezzel már nem kell foglalkoznunk, ugyanis a befogó szerkezet által kifejtett lenyomó erő már biztosítja a kettő közti stabil mechanikai kapcsolatot.

7 A technológia és a kész minták minősítése

Gyártás után az elkészült és felfűrészelt mintákat, melyeket a 7.1. ábra mutat be, optikai, elektromos, termikus és mechanikai mérésekkel vizsgáltam. A méréseket a BME Elektronikus Eszközök Tanszékének Anyagvizsgálati laboratóriumában, valamint a Termikus Laboratóriumában végeztem.



7.1. ábra: bal oldalon a mikrocsatornák, középen az integrált diódák, jobb oldalon pedig a beömlőnyílásokat tartalmazó lezáróelemek

7.1 A gyártási technológia minősítése

A gyártás során egy technológia gyártás közbeni ellenőrzésére alkalmazott módszer, úgy nevezett kísérő szeletek alkalmazása. Ezek a szeletek ugyanazon a diffúziós és termikus processzeken mennek keresztül, mint az eszközöket tartalmazó szeletek, és segítségével az éles mintáink roncsolása nélkül vizsgálhatjuk az egyes technológiai folyamatok minőségét.

A kísérőszeleteken minden egyes magashőmérsékletű technológiai lépés után négytűs mérést végeztem. Az adott mérési eljárással meghatározható az adalékolt felület négyzetes-, vagy másnéven rétegellenállása. A mérés menete a következő: az áramgenerátor 1 mA erősségű áramot kényszerít át a két szélő tűn, a két középső tűn

nagy bemenő ellenállású műszerrel mérjük a feszültséget. Az elhanyagolásokhoz szükséges geometriai feltételek teljesülése esetén:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{U}{I} \approx 4,35 \frac{U}{I}. \quad (7-1)$$

A mérőberendezés a mérést és a számolást automatikusan elvégzi a végeredmény kijelzése mellett. A mért adatokat a 3. táblázat és a 4. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: A foszfor adalékolás változása a technológia során

Minta típusa - kísérő	Foszfor leválasztás után R_{\square} [Ω/\square]	Foszfor behajtás után R_{\square} [Ω/\square]	Bór behajtás után R_{\square} [Ω/\square]	Diffúziós mélység [μm]
P	8,92-9,15	7,09-7,62	6,95	3,96

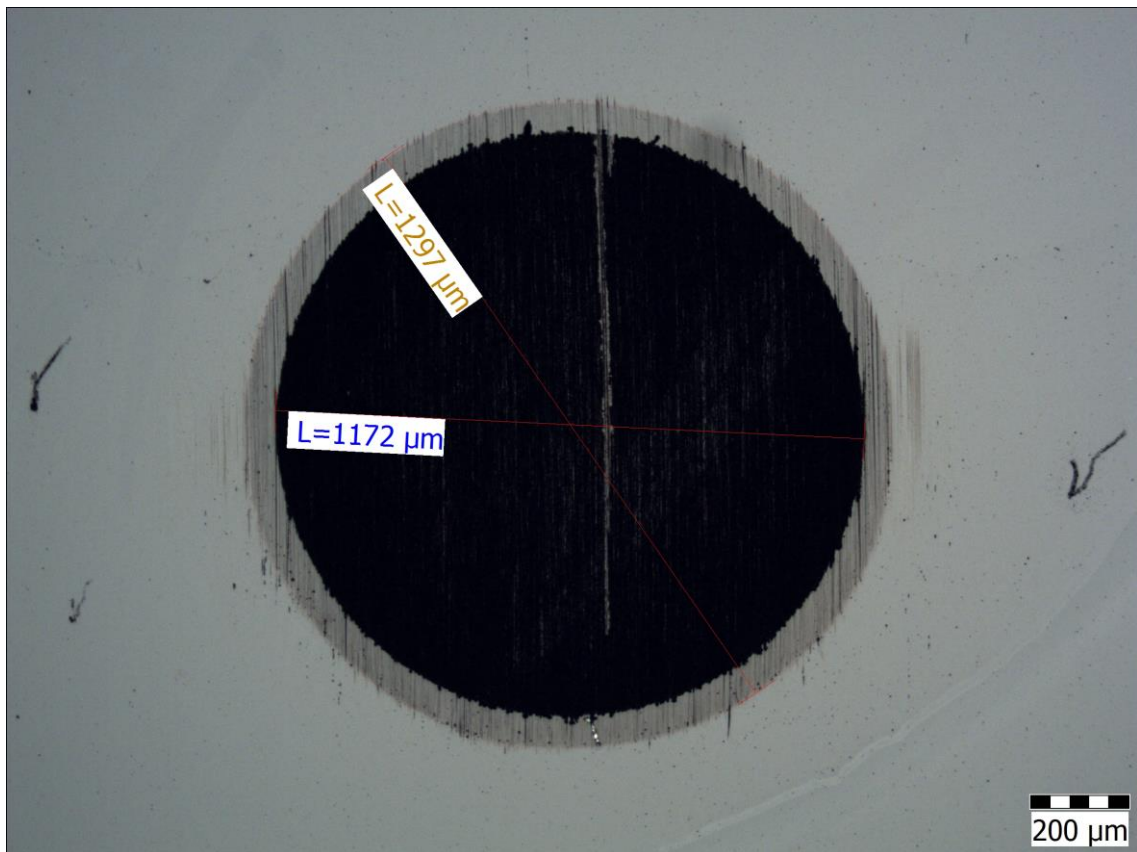
4. táblázat: A bór adalékolás változás a technológia során

Minta típusa - kísérő	Bór leválasztás R_{\square} [Ω/\square]	Bór behajtás R_{\square} [Ω/\square]	Diffúziós mélység [μm]
N	43,75-45,06	68,65-73,6	1,78

A gyártás után a kísérőszeleteken a végleges diffúziós mélységek (x_j) meghatározása céljából, amiket a 3. táblázat és a 4. táblázat utolsó oszlopa tartalmaz, gömbcsiszolatot készítettem, így a pn átmenet kis szög alatt kifut a felületre, tehát hozzáférhetővé válik. Az átmenetet szabad szemmel (mikroszkóppal) láthatóvá tehetjük, ezüstnitrid tartalmú átmenetelőhívóval. A csiszolatban a p és n rétegek elektrokémiai tulajdonságainak különbözősége miatt az előhívószer ezüst tartalma az n rétegen válik ki. Az így kapott gyűrűs kép méreteit, melyet a 7.2. ábra is szemléltet, mikroszkópról leolvasható:

$$x_j = \frac{d_2^2 - d_1^2}{4D}, D = 44,5 \text{ mm}, \quad (7-2)$$

ahol d_2 a külső kör átmérője, d_1 a belsőé, a D pedig a csiszoló gömbbé.



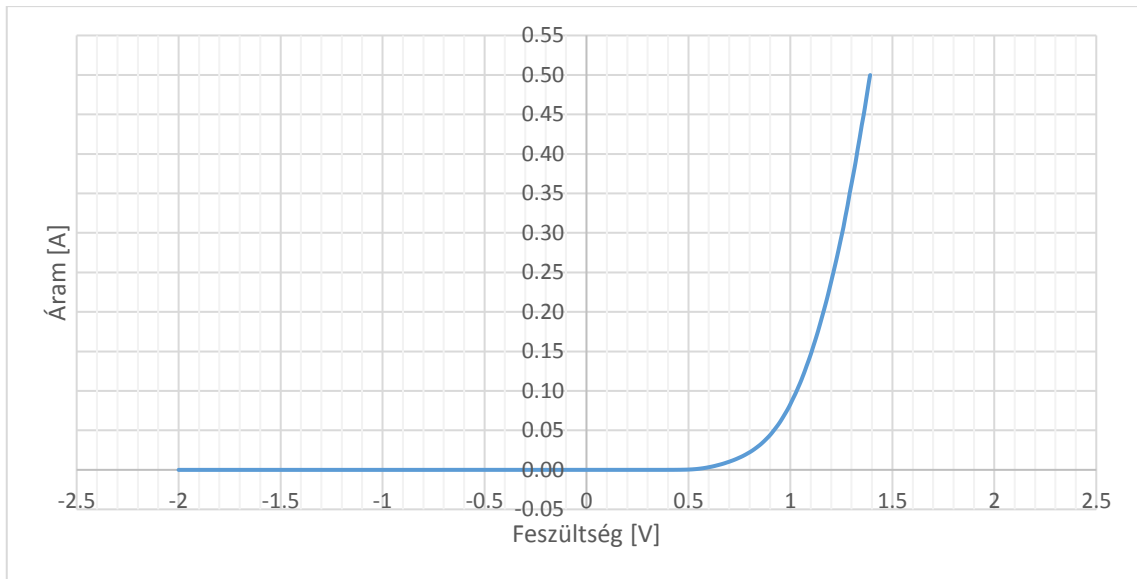
7.2. ábra: A gömbcsiszolat mikroszkópos képe

Az alumínium gőzölés technológiai folyamat minőségét Taylor Hobson Talystep felületi profilométerrel ellenőriztem. A gőzölés során a rezgőkvarcos mérő által mért 280 nm-es rétegvastag megegyezett a profilométerrel mért vastagságokkal.

7.2 A diódák mérése és minősítése

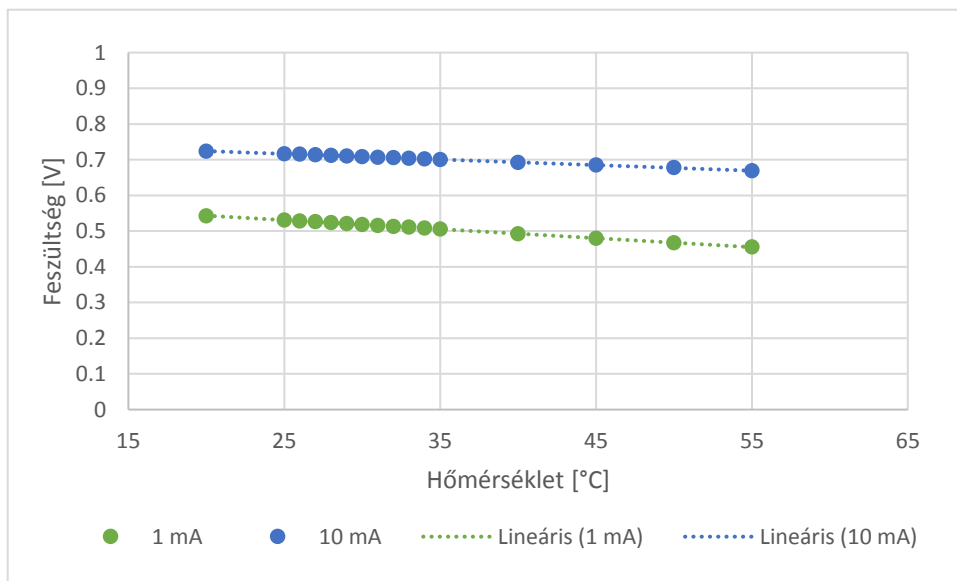
Az elkészült diódák karakterisztikáinak lemérésére a Tektronix által gyártott Keithley 2450 forrásgenerátort is tartalmazó grafikus multiméterét használtam. Az mérőeszköz nagy előnye, hogy a feszültséggenerátornak megadott értékhatárok és lépésközök függvényében automatikusan elvégzi a mérést és a kapott áram értékeket a feszültség függvényében grafikusan meg is jeleníti.

A vártaknak megfelelően a diffúzió inhomogenitás miatt a szelet felületén a diódák minimális eltérést mutatnak. A diódák nyitófeszültsége $\approx 0.9-1$ Volt. A szelet szélein található diódák karakterisztikája laposabb a gyengébb diffúzió okozta soros ellenállás növekedés miatt, de lényeges eltérés nincsen a karakterisztikák között, és hőmérséklet gradiens létrehozásának céljából mindegyik megfelel. Egy átlagos dióda négyvezetékes méréssel mért karakterisztikáját a 7.3. ábra mutatja.



7.3. ábra: Az elkészített dióda karakterisztikája

A diódák hőmérséklet függését a Mentor T3Ster rendszerével 20 és 55 °C fok között vizsgáltam. A mért adatokat a 7.4. ábra mutatja.



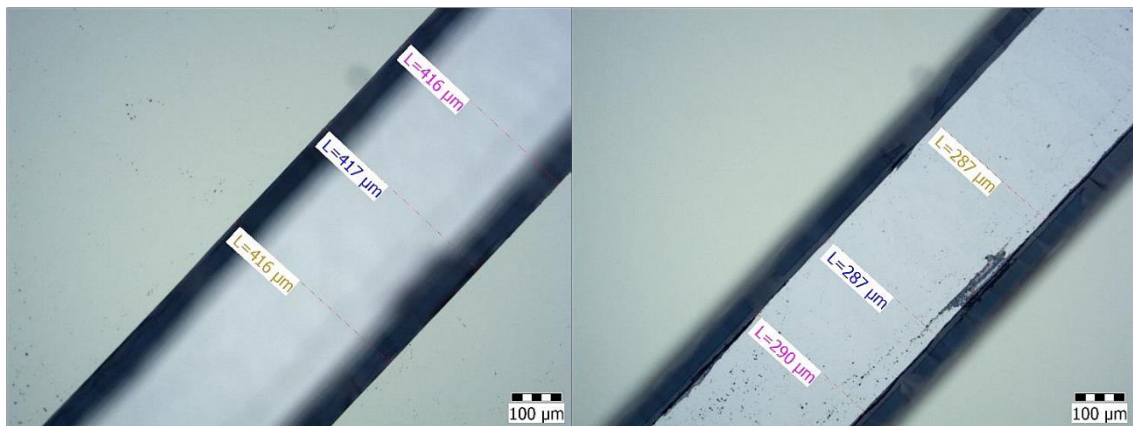
7.4. ábra: A diódák feszültségének hőmérséklet függése 1mA, valamint 10 mA mérőáram esetén

A mért adatpontokra egyenest illesztve jól látszik, hogy a diódák hőmérsékletfüggése lineáris. A méréseket két munkapontban vizsgálva, a pontok jól illeszkednek az egyenesre, ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy a két munkapont esetén eltér a K-faktor mértéke. Az 1 mA-es munkapont esetén 1,572 mV/K, a 10 mA-es munkapont esetén pedig 2,5272 mV/K.

7.3 A csatornák minősítése

A kutatómunka során a minták elkészítése után a felületi topográfiát, a hibahelyeket és a felületen létrejövő alakzatokat Olympus BX51 optikai mikroszkóppal vizsgáltam.

A 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.



**7.5. ábra: A csatorna mikroszkópos képe-
bal oldalon a felső felület, jobb oldalon az alsó mart felület**

A mért eredmények a vártakkal összhangban a sima falakat és mart felületet bizonyították. 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 csatornák horizontális dimenzióit a 7.5. ábra mutatja, ahol a falak simasága is megfigyelhető.

8 Jövőbeli tervek

Az előállított mintákon előzetes hidrodinamikai karakterizáló mérések történtek. Terveimben szerepel a különböző csatornahosszúságú minták, eltérő áramlási sebességgel történő termikus karakterizálása és az elérhető minimális R_{th_MC} hőellenállás meghatározása.

Párhuzamosan futó K+F munka keretében zajló a mérőrendszer átalakítással lehetővé válik folyékony halmazállapotú hűtőközeg keringtetése is a csatornáknban. Jövőbeli terveimben szerepel egy zárt, folyadék közegű hűtőrendszer kialakításához szükséges minták megtervezése és előállítása.

A jelenlegi technológia alkalmazásával lehetővé válik stacked-die struktúrák kialakítása. Ennek kialakításával lehetővé válna a chippek közötti hőátadási jelenségek vizsgálata, karakterizálása.

9 Összefoglalás

A dolgozatban bemutatott munkámat a BME Elektronikus Eszközök Tanszékének kutatási- és fejlesztési projektjébe bekapcsolódva végeztem. Feladatom az volt, hogy az előzetes kísérletek alapján, és a tisztatéri mikroelektronikai laboratóriumban elérhető technológiák felhasználásával a tervezem meg és állítsam össze azt a félvezetőtechnológiai lépéssort, amelyek felhasználásával fűtődiodákkal egybeintegrált, eltérő csatornageometriájú mintákat tartalmazó félvezető alapú eszköz gyártása megvalósítható. Ezzel lehetővé vált – a tanszéken már hosszú ideje futó kutatómunkához kapcsolódó – integrált mikroméretű hűtőbordák hőátadási folyamatainak vizsgálata és karakterizálása.

Szintén szilícium szeletek anizotróp TMAH nedveskémiai marásával elkészítettem a minták lezárására szolgáló chipeket, melyek a csatornamintázatokhoz igazodó beömlőnyílást tartalmaznak. Ezekkel a csatornákat lezárva a mintáim alkalmassá váltak gáz halmazállapotú közegek (levegő, nitrogén) áramoltatására.

Az elkészült mintákat optikai, elektromos, termikus és mechanikai mérésekkel vizsgáltam, melyek során bebizonyosodott, hogy a terveknek megfelelően a mért értékek minden esetben kielégítették az előzetesen támasztott feltételezéseimet.

Irodalomjegyzék

- [1] Takács, G., Bognár, Gy. (2014): *Mikroméretű hűtőeszközök kutatása SoP alkalmazások számára*. Elektronet Magazin 2014/1, Budapest
- [2] Székely, V., Van Bien, T. *Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: A measurement and identification method*, Solid-State Electronics, Volume 31, Issue 9, 1988, Pages 1363-1368, ISSN 0038-1101, DOI: 10.1016/0038-1101(88)90099-8.
- [3] Bognar, Gy., Horvath, G., Kohári, Z., Pang, A.J., Desmulliez, M.P.Y., Poppe, A., Rencz, M., Szekely, V. . *Thermal characterization of a radial micro-channel cooling plate*, Semiconductor Thermal Measurement and Management IEEE Twenty First Annual IEEE Symposium, 2005., 2005, pp. 135-140. DOI: 10.1109/STHERM.2005.1412169
- [4] Takács, G., Szabó, P. G., Bognár, Gy. (2016): *Modelling of the flow -rate dependent partial thermal resistance of integrated microscale cooling structures*. Microsystem Technologies, DOI: 10.1007/s00542-016-2879-2
- [5] Takács, G., Szabó, P. G., Plesz, B., Bognár, Gy. (2014): *Improved thermal characterization method of integrated microscale heat sinks*. Microelectronics Journal - Elsevier, DOI: 10.1016/j.mejo.2014.07.009
- [6] Takács, G., Szabó, P. G., Bognár, Gy. (2015): *Enhanced Thermal Characterization Method of Microscale Heatsink Structures*. Conference Paper (THERMINIC'15), DOI: 10.1109/THERMINIC.2015.7389617
- [7] Takács, G., Szabó, P. G., Bognár, Gy. (2016): *Enhanced Thermal Characterization Method of Microscale Heatsink Structures*. Microelectronics Reliability - Elsevier, DOI: 10.1016/j.microrel.2016.09.019
- [8] 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
- [9] Takács, G., Bognár, Gy., Bándy, E., Rózsás, G., Szabó, P. G. (2016): *Fabrication and Characterization of Microscale Heat Sinks*. Conference Paper (THERMINIC'16)
- [10] 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
- [11] Michael, A., Kwok, C. Y., Al Hafiz, Md., Xu, Y. W. (2013): *Optical Fibre on a Silicon Chip*. InTech, DOI: 10.5772/54246
- [12] Adljuy, O. (2011): *Crystallography orientation*. Faculty of Electrical and Computer Engineering University of Tabriz, Tabriz, Iran.
<http://www.slideshare.net/OmidAdljuy/crystallography-orientation>

- [13] Debnath, K., Arimoto, H., Husain, M. K., Prasmusinto, A., Al-Attili, A., Petra, R., Chong, H. M. H., Reed, G. T., Saito, S. (2016): *Low-Loss Silicon Waveguides and Grating Couplers Fabricated Using Anisotropic Wet Etching Technique*. *Frontiers in Materials*, DOI: [10.3389/fmats.2016.00010](https://doi.org/10.3389/fmats.2016.00010)
- [14] Jaeger, R., Blaloch, T.: *Microelectronic Circuit Design, 4th Edition*, ISBN 978-0-07-338045-2, McGraw-Hill, 2011
- [15] ECE Illinois-ece444: *DifCad diffúziós profil kalkulátor*
<http://fabweb.ece.illinois.edu/utilities/difcad/> (2016. október)
- [16] BYU Brigham Young University: *Oxide Growth Time Calculator*,
<http://www.cleanroom.byu.edu/OxideTimeCalc.phtml> (2016. október)
- [17] BYU Brigham Young University: *Oxide Growth Thickness Calculator*,
<http://www.cleanroom.byu.edu/OxideThickCalc.phtml> (2016. október)
- [18] SCHOTT: *BOROFLOAT 33 leírása*,
<http://www.schott.com/borofloat/english/index.html>, (2016. október)

Függelék

Alapanyag típusa:

4db	DSP szelet:	„n”	1–10 Ω cm	1-0-0 orientáció pn+csat
4db	SSP szelet:	„n”	5-10 Ω cm	1-0-0 orientáció fedők
2db	SSP szelet	“p”	3-6 Ω cm	1-1-1 orientáció kísérő
1db	SSP szelet	“n”	1,2-1, 6 Ω cm	1-1-1 orientáció kísérő

- a foszfor diffúziót a p-típusú kísérők segítségével tudjuk minősíteni (négyzetes ellenállás, diffúziós mélység): P jelzésű szeletet használunk a tömény P8545 forráshoz, P_x jelzésű szeletet használunk az 1P8545:1IPA töménységű oldathoz
- 1:1 foszforos hígítású éles mintáknak x-es jelzést karcolunk a hátoldalára.
- a tömény foszforos éles minták hátoldala jelöletlen marad

Technológiai lépések 4db DSP+kísérők:

Tisztítás és foszfor diffúzióhoz maszkoló oxid növesztés

1. RCA1 tisztítás: oldat T=80°C → vizet melegíteni t=10 percig, a tisztítás t=15perc, 5:1:1 – DI H₂O: NH₄OH: H₂O₂ (200ml DI H₂O, 40ml NH₄OH, 40ml H₂O₂).
2. Öblítés 3x.
3. Oxid marása 1:20 HF-ben, t= 30s.
4. RCA2 tisztítás: oldat T=80°C → vizet melegíteni t=10 percig, a tisztítás t=15perc, 6: 1: 1 – DI H₂O: HCl: H₂O₂ (180ml DI H₂O, 30ml HCl, 30ml H₂O₂).
5. Öblítés 3x.
6. Éles mintákon 200 nm maszkoló oxid növesztése a foszfor diffúzió ellen, 5-ös csőben, T=1100°C-on, t=3óra és száraz oxid, 100% O₂. O₂ (601 cső) 150 egység. A csónak mozgatása t=3perc.

Litográfia a foszfor diffúziós ablaknyitáshoz és SOD foszfor diffúzió

7. Szeletek dehidratálása szüksége esetén T=200°C, t=10 perc.
8. Nitrogénes lefűjás, AZ1518 felvitele az előoldalra 0,5ml, kiegyengetni a szelet széléig, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beszáritás T=100°C-on, t=50s.

9. Megvilágítás – $t \approx 10s$ (MJB pozíciónál 10s-ot kell beállítani), foszfor diffúzió ablak maszk!
10. Előhívás AZ726 MIF hívóban, $t = 30s$.
11. Öblítés és szárítás.
12. Beégetés $T = 115^\circ C$ -on, $t = 50s$
13. Ablakokból SiO_2 eltávolítása BOE oxidmaróban, $t = 180 s$. (80nm/perc+30sec)
14. Öblítés 3x.
15. Fotoreziszt eltávolítása:
 - öblítés használt acetonban majd tiszta acetonban, $t = 15s$
 - öblítés izopropil-alkoholban, $t = 15s$
 - öblítés nagy tisztaságú vízben
16. Az esetleges lakkmaradvány eltávolítása forró Salétromsavban, $t = 10$ percig.
17. A szeletek 3x öblítése nagy tisztaságú vízzel.
18. A szeletek hátoldalának megjelölése: 1:1 foszforos hígítású mintáknak x-es jelzést karcolunk a hátoldalára a flathez.
19. Öblítés, szárítás centrifugálással.
20. Nitrogénes lefújás, Foszfor folyadék felvitele a polírozott oldalra, $V = 0,4ml$, pipettával a folyadékot kiegyengetni a szelet széle felé az egyenletes terület érdekében, centrifugálás 3000rpm, $t = 20s$. Elszívás a szelet fölött 15cm magasságban.
21. Foszfor szárítása hot plate-en, $T = 150^\circ C$ (beállítva $215^\circ C$), $t = 2$ perc. Elszívás a szelet fölött 10cm magasságban.
22. Kísérő p-típusú szeletek félbevágása.
23. Spin-onos csőnél a gázáram beállítása 1,8 slpm, a koncentráció (N_2 98% - O_2 2%). Acél golyóra nézve: N_2 (603 cső) 39 egység – O_2 (601 cső) 43 egység (fekete 89-90)
24. A szeletek csónakba helyezése, a csőben a foszforos oldalak egymás felé néznek. A flat felfelé néz. A csónak mozgatása $t = 3$ perc.
25. gáz → DDD-(félkísérő P_x , x, x , tömény szelet1, tömény szelet2, félkísérő p , félkísérő p) Polirozott-Polirozott-DDD

26. A csónakban a foszforos oldalhoz 3-3 'P' jelű dummy szelet kell!
 27. Az egyik Px félkísérő eltört, ezért csak 1 darab ment végig a technológián!
 28. Leválasztás $T=1000^{\circ}\text{C}$, $t=20\text{perc}$.
 29. PSG marás 1:20 HF-ben, 1:1 esetén $t=1,5\text{ perc}$, tömény esetén $t=4\text{perc}$.
 30. Öblítés 3x.
 31. Szárítás centrifugálással.
 32. Maszkoló oxid növesztése a bór diffúzió ellen, spin-onos csőben, $T=1100^{\circ}\text{C}$ -on, $t=35\text{perc}$ száraz oxid, 100% O_2 . O_2 (601 cső) 150 egység.
-

Litográfia a bór diffúziós ablak nyitáshoz és tárcsás bór diffúzió

33. Szeletek dehidratálása szükség esetén $T=200^{\circ}\text{C}$, $t=10\text{ perc}$
34. AZ1518 felvitele az előoldalra 0,5ml, kiegyengetni a szelet széléig, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beszárítás $T=100^{\circ}\text{C}$ -on, $t=50\text{s}$.
35. Megvilágítás – $t\approx 10\text{s}$ (MJB pozicionálónál 10s-ot kell beállítani), bór diffúzió ablak maszk!
36. Előhívás AZ726 MIF hívóban, $t=30\text{s}$.
37. Öblítés és szárítás.
38. Beégetés $T=115^{\circ}\text{C}$ -on, $t=50\text{s}$
39. Ablakokból SiO_2 eltávolítása BOE oxidmaróban (oxidvastagság $\sim 230\text{nm}$), $t=180+30\text{sec}$.
40. Öblítés 3x.
41. Fotoreziszt eltávolítása:
 - öblítés használt acetonban majd tiszta acetonban, $t=15\text{s}$
 - öblítés izopropil-alkoholban, $t=15\text{s}$
 - öblítés nagy tisztaságú vízben
42. Az esetleges lakkmaradvány eltávolítása forró Salétromsavban, $t=10\text{ percig}$.
43. A szeletek 3x öblítése nagy tisztaságú vízzel.

44. Szárítás centrifugálással.
45. Szárítás a bóros cső elejében, t=5perc.
46. Bór leválasztás, T=990°C, t=30 perc, 100% N₂ gázban. N₂ (601 cső) 150 egység.
A polírozott része a szeleteknek mindig a tárcsa felé néz!
47. Szeletek csónakba helyezése!
48. Fellazító oxidáció, T=990°C, t=10 perc, 100% O₂ gázban. O₂ (601 cső) 150 egység.
49. Bórüveg lemarása P-maróban, t=3,5 perc.
50. A szeletek 3x öblítése nagytisztaságú vízzel.
51. Szárítás centrifugálással.
52. Bór behajtása és TMAH csatornamaráshoz/fémezéshez oxid növesztés (behajtos csőben), T=1100°C, t=45 perc, 100% O₂ gázban

Csatornamarás

53. Keverős VWR hotplate-en dehidratálás, T=200°C, t=10perc
54. Pipetták öblítése acetonban/alkoholban. Szelet N₂-gázos lefújása a centrifugában.
55. AZ1518 felvitele az **előoldalra** (jelöletlen rész) 0,5ml, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beégetés T=115°C-on, t=50s.
56. AZ1518 felvitele a **hátoldalra** 0,5ml, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beszárítás T=100°C-on, t=50s
57. Előoldali megvilágítás: MJB3 maszkillesztő, t=10 sec!
58. Előhívás AZ726 MIF hívóban, t= 30s.
59. Öblítés 3x.
60. Beégetés, T=115°C-on, t=50s.
61. Oxidmarás BOE-ban, marás ideje függ az oxidvastagságtól (82nm~1 perc 20 másodperc).
62. Öblítés 3x.

63. Fotoreziszt eltávolítása tiszta acetonban, művelet megismétlése háromszor, vizes öblítés.
 64. Szárítás centrifugában.
 65. TMAH marás 5%-os oldatban, l=375g (300g H₂O + 75g 25%-os TMAH), szelet behelyezése a vízszintes tartóba alulról a 3. és 6. helyre. Az oldat stabil marási hőmérsékletre való beállási ideje t=40perc. A marás T=92°C, 200 RPM történik, az oldat hőmérsékletét külső hőmérővel kell ellenőrizni, hogy 92°C legyen.
 66. A szelet berakása után ammónium-perszulfát hozzáadása (2g/l/h), m=0,75g.
 67. Marási idő t=75 perc.
 68. Szükség esetén ultrahangos rezgetés tiszta vízben az oxid maradványok eltávolítására
 69. Maradék maszkoló oxid és a csatorna oldalfalainak vizsgálata mikroszkóppal.
 70. Marási mélységek meghatározása, sebesség számítása.
-

Alumínium fémezés és kontaktusok kialakítása

71. Szeletek dehidratálása szükség esetén T=200°C, t=10 perc
72. AZ1518 felvitele az előoldalra 0,5ml, kiegyengetni a szelet széléig, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beszárítás T=100°C-on, t=50s.
73. Megvilágítás – t≈10s (MJB pozíciónál 10s-ot kell beállítani), fémezési ablak maszk!
74. Előhívás AZ726 MIF hívóban, t= 30s.
75. Öblítés és szárítás.
76. Beégetés T=115°C-on, t= 50s
77. Ablakokból SiO₂ eltávolítása BOE oxidmaróban (oxidvastagság <50nm-nél kevesebb), t=60s.
78. Öblítés 3x.
79. Gőzölő bekapcsolása és diffúziós szivattyú bemelegedése
80. Fotoreziszt eltávolítása:

- öblítés használt acetonban majd tiszta acetonban, $t=15s$
 - öblítés izopropil-alkoholban, $t=15s$
 - öblítés nagytisztaságú vízben.
81. Tisztított 15 mm hosszúságú Al huzalok kivágása, hurkonként 2 db lovas felhelyezése a W spirálokra; összesen 20 db lovas
 82. 4V fűtőfeszültség és a III pozíció kiválasztása
 83. Leírás szerint a berendezés kezelése, forgatás és más paraméterek beállítása
 84. Gőzölés 6-8 egységig feltekerés, 20-25 Angstrom rétegnövekedési sebesség beállítása; szükség esetén feljebb lehet tekerni, ha leesik a leválasztási sebesség. ~280 nm rétegvastagság
 85. AZ1518 felvitele az előoldalra 0,5ml, kiegyengetni a szelet széléig, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beszárítás $T=100^{\circ}C$ -on, $t=50s$.
 86. Megvilágítás – $t\approx 10s$ (MJB pozíciónál 10s-ot kell beállítani), kontaktus ablak maszk!
 87. Előhívás AZ726 MIF hívóban, $t= 30s$.
 88. Öblítés és szárítás
 89. Beégetés $T=115^{\circ}C$ -on, $t= 50s$
 90. Al marószer (összetétel: 160ml H_3PO_4 + 10ml HNO_3) pohárba öntése (kb. 100ml), majd a szeletek egyenkénti marása amíg szemmel láthatóan elmaródik az Al a felületről (friss marószer esetén kb. 21 perc 40 másodperc); kis túlmarás (20 sec) alkalmazása a biztos Al réteg eltávolítása érdekében!
 91. Al maró leöblítése és lakk eltávolítása a felületről aceton és alkoholos öblítéssel.
 92. Minták hőkezelése $T=450^{\circ}C$, $t=30$ perc, 100% N_2 gázban ($450^{\circ}C$ beállítva a 6-os csőnél)
 93. Minták fűrészelése

Technológiai lépések 4db SSP:

1. Zuhanyozás nagytisztaságú (18M Ω) vízzel.
2. RCA1 tisztítás: oldat T=80°C → vizet melegíteni t=10 percig, a tisztítás t=10perc, 5:1:1 – DI H₂O: NH₄OH: H₂O₂ (200ml DI H₂O, 40ml NH₄OH, 40ml H₂O₂).
3. Öblítés 3x.
4. Natív oxid marása 1:20HF-ben, t= 30s.
5. RCA2 tisztítás: oldat T=80°C → vizet melegíteni t=10 percig, a tisztítás t=10perc, 6: 1: 1 – DI H₂O: HCl: H₂O₂ (180ml DI H₂O, 30ml HCl, 30ml H₂O₂).
6. Öblítés 3x.
7. Oxidáció T=1100°C, t= 3 óra, DSP szeletekkel együtt készült, 100% O₂. 150 egység. Csónak mozgatási idő 3 perc.
8. Keverős VWR hotplate-en dehidratálás, T=200°C, t=10perc
9. Pipetták öblítése acetonban/alkoholban. Szelet N₂-gázban lefújása a centrifugában.
10. AZ1518 felvitele a **hátdoldalra** 0,5ml, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beégetés T=115°C-on, t=50s.
11. AZ1518 felvitele az **előoldalra** 0,5ml, 2200 RPM, ramp 9s, centrifugálás 30s, beszárítás T=100°C-on, t=50s
12. Előoldali megvilágítás: MJB3 maszkillesztő, t=10 sec!
13. Előhívás AZ726 MIF hívóban, t= 30s.
14. Öblítés 3x.
15. Beégetés, T=115°C-on, t=50s.
16. Oxidmarás BOE-ban, marás ideje függ az oxidvastagságtól (200nm), t=170sec.
17. Öblítés 3x.
18. Fotoreziszt eltávolítása tiszta acetonban, művelet megismétlése háromszor, vizes öblítés.
19. Szárítás centrifugában.
20. TMAH marás 5%-os oldatban, l=375g (300g H₂O + 75g 25%-os TMAH), szelet behelyezése a vízszintes tartóba alulról a 3.és 6. helyre. Az oldat stabil marási

hőmérsékletre való beállási ideje $t=40$ perc. A marás $T=92^{\circ}\text{C}$, 200 RPM történik, az oldat hőmérsékletét külső hőmérővel kell ellenőrizni, hogy 92°C legyen.

21. A szelet berakása után ammónium-perszulfát hozzáadása (2g/l/h), $m=0,75\text{g}$.
22. Marási idő szeletvastagság szerint. A marási idő a szelet átlukadásáig 3:42 és 3:35 volt.
23. Szükség esetén ultrahangos rezgetés tiszta vízben az oxid maradványok eltávolítására
24. Maradék maszkoló oxid és a csatorna oldalfalainak vizsgálata mikroszkóppal.
25. Marási mélységek meghatározása, sebesség számítása.