

**ZÁRÓJELENTÉS****Aktuálási elvek mozgó 3D mikroszerkezetekben (F 61583)**

(2006. január 1-től 2010. január 31-ig)

Fürjes Péter

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet - MEMS Laboratórium

**Kutatási célok, eredmények összefoglalása**

A modern technológiák a MEMS (mikro elektro-mechanikai) eszközöket széles körben alkalmazzák, és ezen belül is egyre hangsúlyosabb szerepet kapnak az összetett, aktív elemeket is tartalmazó integrált mikrorendszerek. A beavatkozók jellegzetes csoportját alkotják a szabadon álló, megfelelő technikai megoldásokkal kialakított, felfüggesztett 3D alakzatok, amelyek különböző módszerekkel mozgathatók (pl. mikroáramlási csatornában elhelyezett szelepek, turbinák, mozgatható tükrökből felépülő hálózatok, stb.). Az alapvetően alkalmazott mozgató technikák mágneses, termikus és elektrosztatikus jelenségeken alapulnak.

A kutatás alapvető célja volt, hogy **megvizsgáljam a vezérelt mikroméretű eszközökben lejátszódó fizikai folyamatok jellegét**, és ennek segítségével **tervezhetővé tegyem az egyes szerkezetek funkcionális viselkedését**, valamint **specifikus kialakítási technológiákat dolgozzak ki** különleges 3D struktúrák megvalósítását célozva, beleértve a **strukturális anyagok megválasztását** is. Ennek érdekében különböző **tesztstruktúrákat terveztem és alakítottam ki** az MFA MEMS Laboratóriumában, és vizsgáltam ezek működését. Emellett végesekem kód felhasználásával **termo-mechanikai, illetve elektro-mechanikai szimulációkat végeztem**, amelyek elősegítik a lejátszódó folyamatok könnyebb megértését, és lehetővé teszik a későbbiekben megvalósítandó eszközök működésének tervezését. A modellszámítások és a kísérletek összehasonlítása alapján **demonstrációs eszközöket állítottam elő**, és ezek működésén keresztül vizsgáltam a mozgó struktúrák mechanikai és funkcionális jellemzőit.

MEMS (micro-electro-mechanical systems) are widely applied in modern technologies. The complex, integrated micro-systems containing active parts play determining role in increasing number of applications. A dominant section of the actuators is constituted by the free standing, suspended 3D structures, which can be actuated, displaced (valves and turbines situated in micro flow channels, arrays of movable-rotating mirrors, etc.). The basic actuation principles are based on magnetic, electrostatic or thermal processes.

The ultimate goals of the research were the **analysis of the physical phenomena involved in moving microstructures, to support the functional design of the specific devices. Development of specific fabrication technology** was also planned for achieving the realisation of special 3D structures including **the specification of the possible structural materials**. In order to succeed the project's objective different **test-structures were designed, realized and investigated** using the infrastructure of the MEMS Laboratory at the Research Institute for Technical Physics and Materials Science. **Thermo-mechanical and electro-mechanical simulations were performed** – applying finite element modelling – to support the comprehension of the physical processes and to predict the functional properties of the planned devices. On the basis of model calculations and experiments **demonstration devices were constructed** and their functional and mechanical behaviour were investigated.

**A kutatási tervezett mérföldkövei**

- A különböző aktuálási elveket alkalmazó egyszerű struktúrák tervezése és megvalósítása, amelyek segítségével az egyes mechanizmusok azonosíthatók.
- Technológiai előkísérletek a szilícium tömbi és / vagy felületi mikromechanikai megmunkálásával kialakítható struktúrák megvalósítása érdekében. Hordozó elektromosan szigetelt kötése a 3D struktúrát tartalmazó szilícium szubsztráthoz.
- Termo-mechanikai és elektro-mechanikai szimulációk kivitelezése a megfelelő geometriai alakzatokat (méret, forma, rétegszerkezetek) megtervezése és az egyes strukturális anyagok kiválasztására érdekében.
- A szerkezetek vezérléséhez szükséges rendszer kiépítése.
- A modellek alapján demonstrációs eszközök tervezése és megvalósítása.

## Eredmények

OTKA támogatás segítségével kezdődtek meg a szenzor struktúrák fejlesztése mellett a **mozgó, illetve aktívan vezérelhető MEMS eszközök kialakításának és alkalmazásának kutatásai** laboratóriumunkban.

A különböző mozgatási módok komplex 3D szerkezetek kidolgozását, és így eltérő technológiai megoldásokat feltételeznek, amelyek kidolgozása, illetve vizsgálata sokrétű feladatot állít a kutatások elé. A mozgó mikroszerkezetek megbízható megvalósítása számos kritikus kérdést vet fel, mind mikrotechnológiai, mind anyagszerkezeti, mind fizikai vonatkozásokban. A háromdimenziós mikrostruktúrák alkalmazhatósága, és a megvalósított szerkezetek eszköztulajdonságokra gyakorolt hatása nagyban függ a körültekintő anyagválasztástól, szerkezeti tervezéstől, az alkalmazott technológiai megoldásoktól is. Ezek kidolgozása részletes vizsgálatokat igényel.

A technológiai fejlesztések mellett elengedhetetlen a mikroméretű eszközökben lejátszódó fizikai folyamatok, illetve ezek eszköztulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata. A mikromechanikai eljárásokkal előállított eszközök tervezése és kialakítása során is kikerülhetetlen a szimulációs módszerek alkalmazása, kiterjesztve a kapcsolt fizikai (termo-mechanikai, elektro-mechanikai) problémákra is.

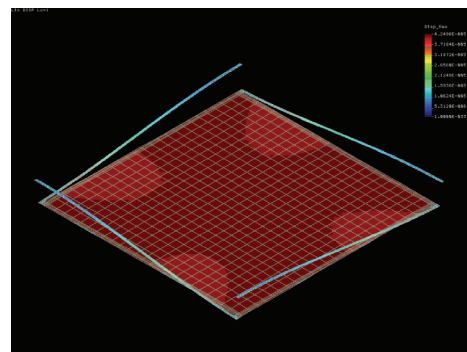
- A projekt első időszakában mozgatási elvek (elektrosztatikus, termikus) alkalmazhatóságának vizsgálata érdekében (FEM) **végelem szimulációk** segítségével elemeztem a tervezett szerkezetek megvalósíthatóságát, illetve előre jelezhető tulajdonságait (deformáció, mozgatási sebesség, a rétegszerkezetek tulajdonságaiból adódó maradó feszültségek).
- Komplex, magas hőmérsékletek elérésére alkalmas teszteszköz kifejlesztésével, megvalósításával és tesztelésével **vizsgáltam egyes szerkezeti rétegek termo-mechanikai tulajdonságait**, funkcionális alkalmazhatóságukat a tervezett mozgó struktúrákban.
- **Egyedi – tömbi mikromechanikai eljárásokon alapuló – előállítási technológiát dolgoztam ki** felfüggesztett, perforált vékony (2-4 $\mu$ m) szilíciummembránok megvalósítása érdekében, szem előtt tartva a rétegszerkezetekben ébredő mechanikai feszültség minimalizálását. Ezzel párhuzamosan munkatársaimmal **megoldottuk a szilícium szubsztrát szilíciumhoz, illetve üveg hordozóhoz történő kötését**.
- A laboratóriumunkban alkalmazott **pórusos segédréteg technológiát integráltam** termikusan vezérelhető felfüggesztett szerkezetek előállítási eljárásába, passzív és aktív mikrofluidikai elemeket egyszerre tartalmazó komplex szerkezetek kialakítását célozva.
- A korábbi kutatások – *Új eljárások a Si mikromechanikai megmunkálásában (T047002)* – során kifejlesztett **protonsugaras litográfián alapuló 3D megmunkálási technológiát továbbfejlesztve** elektrosztatikusan vezérelhető forgó mikroszerkezetek (mikromotor) kialakítását céloztuk meg, amelynek technológiai megvalósítására lépéseket tettünk munkatársaimmal.
- Különösen pontosan vezérelhető (optikai) szerkezetek kialakítása érdekében **felületi mikromechanikai eljárásokon alapuló technológiát terveztem**.
- A projekt korábbi eredményeit – technológiai fejlesztések, anyagszerkezeti vizsgálatok, termo-mechanikai szimulációk – felhasználva **demonstrációs eszközöket alakítottam ki**, különböző – termikus és elektrosztatikus – vezérlési módok vizsgálatához. Fontos szempont volt az eszközök megválasztása, tervezése és kialakítása során, hogy azok konkrét funkcionális feladatokat is el tudjanak látni egy esetleges aktív MEMS eszközben (mikrofluidikai, optikai alkalmazás).

## A kutatás részletes ismertetése

### Tesztaljakatok végelem szimuláción alapuló tervezése

A MEMS Laboratórium technológiai lehetőségeit áttekintve a kutatások első lépéseként egyszerű, mozgatható 3D szerkezetek megvalósíthatósági vizsgálatai indultak el. Mechanikai modellek elemzésével vizsgáltam a különböző struktúrák érzékenységi és mechanikai stabilitási jellemzőit. Kiemelt figyelmet kaptak az esetleges terhelések hatására kialakuló mechanikai deformációk és feszültségek, illetve a termikus vezérlés esetén különösen fontos hőtani jellemzők. A szimulációk tanulsága szerint a megfelelő érzékenység elérése érdekében különösen vékony (1-4 mikrométer) membránok kialakítása szükséges.

Az elektrosztatikus vezérlés a legelterjedtebb az aktívan mozgó szerkezetek esetén, tükrök, pumpák de akár mikroméretű motorok is kialakíthatók alkalmazásával, azonban megvalósításuk nagy kihívást jelent mind az elektromos vezérlés, mind pedig a 3D mikromegekálás



4 karon felfüggesztett membrán deformációja során kialakuló mechanikai feszültségeloszlás

szempontjából. A későbbi alkalmazásoknak megfelelő különböző térbeli elrendezésű felfüggesztett szilícium vékonyréteg (membrán) struktúrák mechanikai tulajdonságait modelleztem. Egy, kettő és négy karon felfüggesztett, 1000-1200-1500 $\mu\text{m}$  oldalhosszúságú, 2-4 $\mu\text{m}$  membránvastagságú négyzetes struktúrákat terveztem, a felfüggesztő karok szélessége 20 $\mu\text{m}$  a tervek szerint. Vizsgáltam az adott mozgóerő alkalmazása esetén keletkező deformációt, az ébredő feszültségeloszlást, illetve a vezérlési sebességet meghatározó sajátfrekvenciát. A technológiai lehetőségeket figyelembe véve a membránok sajátfrekvenciája 200-500Hz között állítható be a modellszámítások szerint.

A későbbiekben részletezett proton sugaras litográfia segítségével megvalósítható mikromotor elektromos modelljét a COMSOL Multiphysics végelem szoftver Electrostatic Application modulja segítségével készítettem el. Az álló- és forgórész geometriájának optimalizálása és az előállítási paraméterek (PBW) meghatározása céljából elemeztem az elektrosztatikus erőhatásokat. A későbbiekben a probléma kiterjesztésével egy elektromechanikus modell felállítása a célom, mely a funkcionalitás szélesebb körű vizsgálatát teszi majd lehetővé.

Mechanikai modellek alkalmazásával áramlási csatornában elhelyezett szelepek viselkedését is vizsgáltam, amelynek kialakítása a pórusos szilícium marási technika továbbfejlesztésével történik. [1, 2]

A megfelelő rétegszerkezetek alkalmazásával kialakított (bimetál) tartók mozgatása fűtőtest integrálásával alkalmas lehet termikus vezérlés megvalósítására. A mikroszerkezetek geometriai, anyagszerkezeti tervezése elengedhetetlen, kritikus pontja azonban a helyes termo-mechanikai paraméterek alkalmazása, amelyek sok esetben méret és technológiától függő értékek. A vezérelhető szerkezetek tervezhetősége érdekében végeztem előzetes modellszámításokat mikro-áramlási csatornában elhelyezett, termikusan vezérelhető szelep viselkedését elemezve. [3, 4]

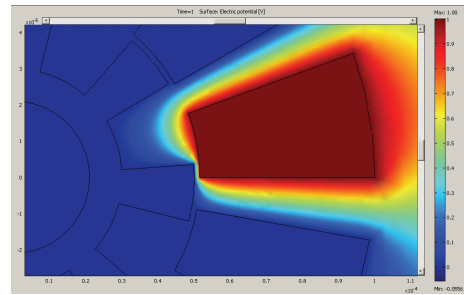
Strukturális anyagok viselkedésének vizsgálata teststruktúrák alkalmazásával

Az eszközök előállíthatóságának komoly feltétele a megfelelő mechanikai és elektronikai megbízhatóság, amelynek érdekében vizsgáltam a vezetékezésésként alkalmazandó platina vékonyrétegek degradációját a termikus szerkezeteknél különösen kritikus magas hőmérsékletű alkalmazásokban.

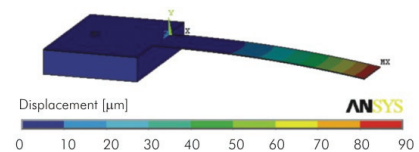
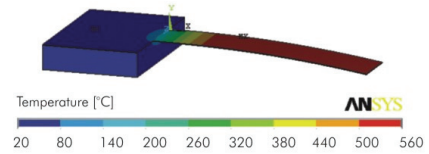
A 3D mikrostruktúrák viselkedését és a periodikusan változó hőmérsékletű, deformálódó struktúrákban lejátszódó hőterjedési jelenségeket elemeztem különleges termikus viszonyok között, amelyek a gyors termikus vezérlés esetén jellemzőek. A hőmérsékleti fáziseloszlás alapján a vékonyrétegekben véges terjedési sebesség és a fonon-vezetés hullámtermészete is detektálható. További hővezetési anomáliákat okoz a periodikusan deformálódó elemek feszültségfüggő hővezetési tulajdonságainak változása, amit véges-elem program segítségével elemeztem. [5, 6]

A magas hőmérsékleten leválasztott strukturális rétegek szobahőmérsékleten megmaradó feszültségállapota korlátozhatja a működési tulajdonságokat, a deformációk miatt. Termo-mechanikai elemzések segítségével vizsgáltam szilícium, szilícium-nitrid, illetve különböző szemcseszerkezetű polikristályos gyémánt szerkezeti rétegek alkalmazása esetén a különböző vezetőrétegek (platina, arany, polikristályos-szilícium) leválasztása során kialakuló feszültségeloszlásokat és deformációkat, meghatározva a legkisebb maradó deformációt biztosító rétegszerkezeteket. [7]

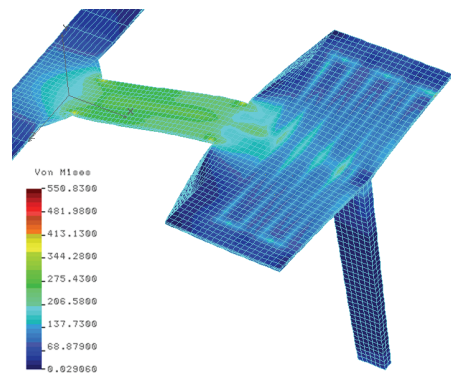
Teststruktúrákat alkalmazva – modellszámítások és mérési eredmények kombinálásával - vizsgáltam egyes szerkezeti anyagok fizikai jellemzőit. A MEMS szerkezetekben alkalmazott strukturális anyagok mechanikai és termikus tulajdonságainak pontos ismerete a geometriai és funkcionális tervezés fontos eleme. Ezen jellemzők megállapítása a struktúrák komplexitása, a kialakítási folyamatok eltérése és a méreteffektusok miatt bonyolult. A kutatások során bevezettem egy széles körben alkalmazható mikroméretű multi-réteg fűtőtest struktúrákat, amely segítségével a szerkezeti anyagok hővezetési és mechanikai tulajdonságai meghatározhatók a megfelelő mérések és modellszámítások összevetésével, és a szerkezetet alkalmaztam a felhasználandó anyagok (sztöchiometrikus és nem-sztöchiometrikus szilícium-nitrid, mikro- és ultranokristályos gyémánt (UNCD), platina, poli-szilícium) vizsgálatára. [8, 9]



Potenciáeloszlás 2D mikromotor struktúra esetén



Termikusan vezérelt szelep végelem modellje



Termikusan vezérelt szelep végelem modellje

### Felfüggesztett egykristályos szilícium membránok kialakítása tömbi mikromechanikai eljárások alkalmazásával

Vizsgálatok indultak az extrém vékony szilícium membránok megbízható kialakításának érdekében. A pórusos szilícium mikromechanika illetve az anizotróp KOH marás és elektrokémiai marásmegállítás kombinációjának alkalmazhatóságát vizsgáltam. Ennek érdekében speciális, számítógéppel vezérelhető elektrokémiai marókamra került kialakításra.

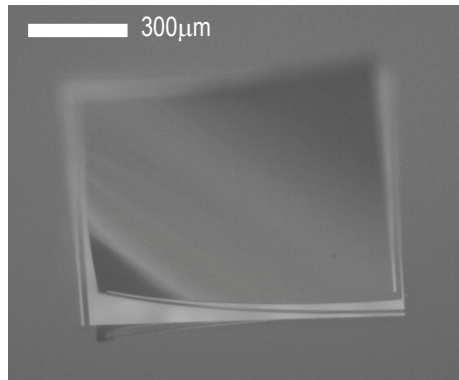
A modellkísérletek alapján alkalmazhatónak ígérkező tesztaljakatok megvalósításra kerültek, ami a technológia kidolgozását, a megfelelő litográfiai maszkok megtervezését és elkészítését, és a membránok kialakítását takarja. Az aktuátor szerkezetek mozgó egységét alkotó strukturált vékonyrétegek (például flexibilis karokon felfüggesztett tükröző felületek) megbízható megvalósítása érdekében a korábban alkalmazott membránkialakítási technológiák továbbfejlesztésére volt szükség. Strukturált szilícium membránok kialakításának lehetőségét vizsgáltam a felület adalékolással történő szelektív módosításának segítségével. A szilícium membránok elektrokémiai marásmegállítással történő megvalósítása érdekében megfelelő p-n átmenetet tartalmazó, arany kontaktussal ellátott, kétoldali maszkillesztéssel megmunkált szubsztrátokon helyeztem el a tesztbrákat. A szelektív adalékolás csak korlátozottan alkalmazható a kívánt 2-4 $\mu$ m vastagságú membrán elektrokémiai marásmegállítással (ECES) történő kialakítása során, így a laterális strukturálást a teljes membrán megvalósítása után Reaktív Ion Marással (RIE) hoztam létre. Ezen megoldáshoz biztosan alkalmazható ECES technikát fejlesztettem ki 2-4 $\mu$ m vastagságú tömör szilícium membránok kialakítására. Legnagyobb gondot a lúgos marószerben alkalmazható, kiváló szigetelésű szelettartó kialakítása okozta.

Vizsgáltam az egyes kontaktus illetve maszkoló fémrétegek (alumínium, arany) eszköztulajdonságokra gyakorolt hatását – a későbbiekben tükröző réteggént történő alkalmazásukat is figyelembe véve. Kidolgoztam a RIE marással kombinált struktúrakialakítási technikát felfüggesztett membránok létrehozása érdekében, különös tekintettel a későbbi alkalmazások esetén elengedhetetlen, megfelelő optikai minőségű és minimális mértékben deformált fém felület biztosítására. Az arany/szilícium rétegstruktúra kedvezőbb maradó feszültségeloszlását és kisebb deformáltságát figyelembe véve a végleges struktúra arany maszkoló réteggel került kialakításra.

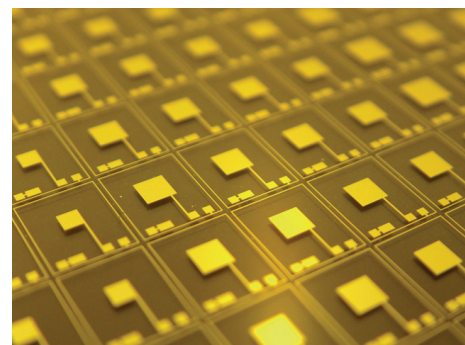
A teszt-aljakatok kialakításához – elektrosztatikus és mágneses vezérlés esetén – elengedhetetlen az ellenelektrodákat, illetve a sík-tekerceket tartalmazó hordozó elektromosan szigetelt kötése a 3D struktúrát tartalmazó szilícium szubsztráthoz. Az ellenelektrodák kialakítása történhet üveg, illetve megfelelő szigetelő réteggel ellátott szilícium hordozón.

Szilícium hordozón kialakított elektródahálózatot tartalmazó tesztcsomagok kötési lehetőségeit vizsgáltam adhéziós köztes réteg (arany, alumínium illetve vastag polimer (fotoreziszt lakk) alkalmazásával. Nem sikerült megnyugtató megoldást találni a problémára, ugyanis a polimer réteg nem ad megfelelő kötési erősséget, a fém kötőréteg magas (ötvöződési) hőmérsékleten történő alkalmazása pedig a szigetelő rétegek átszúrását kockáztatja, ami az elektromos vezetékzárás zárlatát okozza.

A problémát a 2009-ben beszerzett Karl Süss MA/BA-6 maszkillesztő/szelektív berendezés beszerzése oldotta meg (a projekt-hosszabítás egyik fő oka is ez volt), hiszen ennek segítségével illesztett módon lehetséges szilícium-üveg kötést létrehozni anódikus bondolás segítségével. Ezzel lehetővé vált mozgó szilícium vékonymembrán és statikus, üveg hordozón kialakított fém elektródát tartalmazó szerkezetek létrehozása.



A maradó feszültségek miatt erősen deformált, 4 karon felfüggesztett membrán.



Üveg hordozón elhelyezett ellenelektrodák rajzolata szelektív kötés előtt.

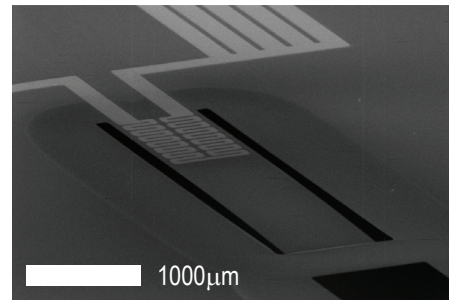
### Termikusan vezérelhető felfüggesztett szerkezet kialakítása pórusos szilícium segédréteg technológia alkalmazásával

A mikrofluidikai alkalmazásokat megcélözva termikusan vezérelhető szelepek kialakításával demonstráltam az aktív elemek létrehozásának lehetőségeit. A vezérelhető alkatrészek kialakítása fontos lépése a mikrofluidikai rendszerek fejlesztésének, amelyek mikroreaktorok, Lab-on-a-Chip eszközök alapelemei lehetnek. Az aktív elemek mellett a mikrofluidikai csatornák pontos méreteket eredményező kialakítását is vizsgáltam. A teszt eszköz kialakítása a MEMS technológia pontos alkalmazását, illetve lehetőség szerinti továbbfejlesztését feltételezi. A mikrofluidikai rendszer aktív elemeinek megvalósítása a szilícium 3D tömbi megmunkálását alkalmazva, felfüggesztett platina mikrofűtőtest létrehozásával történt, kis maradó feszültségű nem-sztöchiometrikus szilícium-nitrid és szilícium-oxid multi-réteg tartószerkezetet kialakításával. A mechanikai tulajdonságok javítása érdekében vizsgáltam a szerkezet mechanikai terhelési és feszültségviszonyait különböző vastagságarányú (SiN<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>/Ti/Pt/SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub>) rétegszerkezetek esetén. A rétegszerkezetet CVD technikával alakítottam ki, a platina fűtőtest (titán-oxid tapadóréteggel) vákuumporlasztással készült. A megvalósított eszközök funkcionális viselkedését áramgenerátoros vezérléssel vizsgáltam.

A szerkezet passzív tagjait alkotó mikrocsatornákat pórusos szilícium mikromechanika segítségével alakítottam ki, ellendarabként mikrostrukturált PDMS réteget alkalmaztam. A PDMS rétegben kialakítandó csatornák laterális méreteinek pontos beállítása érdekében előkísérleteket végeztem az alkalmazott öntőforma méreteinek változtatásával, feltérképezve az elérhető felbontás és oldalarány értékeket az alkalmazott primer lakkstruktúra méreteinek függvényében.

A kialakított mozgó kantilever struktúra optikai feladatokra (kapcsolóként) történő alkalmazását célozva kiváló minőségű reflektív réteg leválasztását is megvalósítottam. A magas működési hőmérsékletre való tekintettel porlasztott titán réteget alkalmazva vizsgáltam a szerkezet termo-mechanikai jellemzőit. [3, 4]

Teljesen zárt membránok egyoldali 3D tömbi megmunkálás segítségével történő kialakításával is kísérleteztem. A pórusos szilícium marás és a nagy áramsűrűség mellett végrehajtott anódikus polírozómarás kombinációjával lehetséges pórusos réteggel lezárt eltemetett üregek létrehozása. A pórusos réteg visszakristályosítása lehetőséget ad kristályos membrán kialakítására, azonban ennek megvalósítása még további vizsgálatokat igényel. [10]



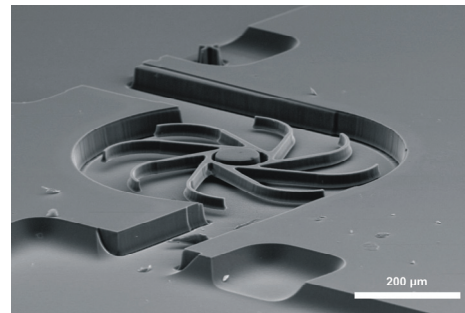
*Pórusos Si segédreteg technológiával megvalósított, termikusan vezérelhető felfüggesztett multiréteg szerkezet*

### *Mozgó 3D szilícium struktúrák kialakítása különleges eljárásokkal*

A debreceni Atommagkutató Intézzel közösen (Rajta István), OTKA támogatással folytattunk kísérleteket különleges, mozgó 3D struktúrák kialakítási technikáinak továbbfejlesztése érdekében. Demonstráltuk a proton litográfia (PBW) megbízható alkalmazhatóságát az implantációval módosított tulajdonságú Si egykristály szelektív eltávolításával kialakított turbinák létrehozásával. Sikertelen megoldanunk a MEMS technológia és a PBW (Proton Beam Writing) technika megbízható illesztését, amelynek segítségével mozgó alkatrészek előállítása vált lehetővé. [11, 12]

A technológia továbbfejlesztése érdekében vizsgáltuk a proton-implantáció és az elektrokémiai marás során fellépő fizikai jelenségeket, amelyek befolyásolják a kialakítandó szerkezet geometriai jellemzőit. A megfelelő modellek elemzése, és technológiai fejlesztések eredményeképpen demonstráltuk javított geometriai jellemzőkkel rendelkező turbina megvalósíthatóságát. A geometria rugalmassága lehetővé teszi a kifejlesztett technológiával mikromotor forgórész megbízható kialakítását, így ezt célozva indultak előzetes modellszámítások és technológiai kísérletek az eszköz megvalósítása érdekében. [13, 14, 15]

A 3D mozgó alkatrészek kopása és degradációja jelentős problémának bizonyul alkalmazásuk során, így ezek keménybevonattal történő védelme elkerülhetetlen. Kísérleteket folytattunk komplex 3D szerkezetek kemény vékonyréteggel történő konform fedését célozva. Különböző anyagok (szilícium-nitrid, titán-nitrid) és leválasztási technológiák (LP-CVD, reaktív magnetronos porlasztás) alkalmazhatóságát vizsgáltuk meg a kialakuló réteg minősítésén keresztül (mechanikai tulajdonságok, konformitás). [16]



*A MEMS technológia és a protonsugaras direktírás kombinálásával megvalósított mozgó 3D szerkezet*

### *Mikrokantilever szerkezetek kialakítása felületi mikromechanikai technológiával*

A Casimir-effektus demonstrálására és mérésére illetve elektro-aktuálásra alkalmas mikroszerkezetek (felfüggesztett tartók) tervezését kezdtük meg laboratóriumunkban. A geometriai tervezést FEM szimulációval támogattuk, illetve előkísérleteket végeztünk a poli-szilícium alapú, szilícium-oxid segédreteget alkalmazó felületi mikromechanikai eljárás lépéseinek kidolgozása érdekében. A kialakított eszközök (2-4 karon illetve torziós tartón felfüggesztett membránok, 6x9-es mikrotükör-mátrix) megvalósítása során az ellenelektrodák kialakítása erősen adalékolt poli-szilícium strukturálásával történt, a mozgó elektrodákat szintén poli-szilícium alkotja. A technológia kritikus pontja a két poli-szilícium réteg közötti feláldozandó szilícium-dioxid réteg eltávolítása. A struktúrák megfelelő optikai tulajdonságait – ami egyben a RIE marás elleni maszkol – arany fémréteggel biztosítottuk. A kialakított szerkezetek tesztjeit folyamatosan végezzük.

### *Tesztplatform kialakítása*

A kialakított szerkezetek megfelelően gyors és pontos vezérlése érdekében beszerzésre került egy programozható AC áramforrás (Keithley 6221 modell), amely lehetővé teszi extrém alacsony áramok (2pA és 100mA között, 10MHz-es frissítéssel) pontos és alacsony zajú alkalmazását. Beépített arbitrás jelalakok alkalmazhatók 1mHz és 100kHz tartományban, a beállítható legkisebb impulzushossz 5mikrosec. Az eszköz kiválóan alkalmazható mikroszerkezetek nagy sebességű, pontos termikus és mágneses vezérlése estén. A feszültségvezérelt aktuátor szerkezetek vizsgálatát függvénygenerátor alkalmazásával oldjuk meg (GOODWILL SFG-2104 DDS). A tesztplatform kiegészült még egy LRC mérő egységgel (GOODWILL LCR-819) is, amely az

eszközök elektronikus jellemzőinek elemzését szolgálja. A mérőeszközök vezérlését egy erre a feladatra dedikált számítógéppel oldjuk meg (HP Compaq NC8430), amely természetesen a FEM szimulációs számítások elvégzésére is alkalmas.

A kialakított eszközök vizsgálatát és funkcionális elemzését elősegítendő – más projektek pénzügyi forrásainak bevonásával – beszerzésre került egy Zeiss AxioScope A1 rendszerű mikroszkóp, amely a specifikus elvárásoknak megfelelően nagy munkatávolságú objektívekkel, illetve mikron felbontású deformációk diffrakción alapuló mérésére alkalmas C-DIC / DIC / TIC reflektor modulal van felszerelve.

### Módosítások

A három-négy éves kutatási időszak alatt sok esetben kerülhetünk szembe olyan problémákkal, amelyek megoldása – a terveinkhez képest – irreálisnak mondható, vagy anyagi, vagy technológiai szempontokat figyelembe véve. A terveim között szereplő mágneses vezérlés témakörére a projekt fő eredményeiben nem tértem ki, mert a kutatási időszak alatt kiderült, hogy megvalósítása aránytalanul nagy technológiai kihívásokat állít a projekt elé, és ennek megfelelően az eredmények is szerényebbek ezen a területen.

### Pénzügyi módosítások

A projekt első évében a COSMOS FEM szimulációs szoftver helyett az ANSYS kód használati jogának megvásárlása mellett döntöttem. Az ANSYS a leggyorsabban fejlődő alkalmazás kapcsolt fizikai problémák véges-elem módszerrel történő megoldására, így alkalmazása ígéretesebb a MEMS struktúrák elemzésében.

2009-ben a projekt egy évvel történő meghosszabbítását kérelmeztem, hogy a szeletkötési eljárások megvalósítása érdekében beszerzésre került Karl Süß MA/BA-6 maszkillesztő és anódos szeletkötő berendezést alkalmazhassam az elektrosztatikus vezérlés esetén elengedhetetlen ellenelektroda rendszer létrehozásához, amelyhez az OTKA kollokvium hozzájárult. A felületi mikromechanikai technológia kidolgozása is folyamatos feladatot ad, és ennek befejezése áttolódott a projekt 3 éves tervezett időtartamán.

### Hatás

Kísérleteimmel reményeim szerint meghonosítom a szenzorok mellett a mikroméretű integrálható beavatkozók kutatását is. Az MFA MEMS Laboratórium eszköz- és tudásbázisára alapozott új kutatási irány hazánkban egyedülállóan mondható lehetőséget jelent, és nagy jelentőséggel bír az egyetemi oktatásban is.

Az aktívan mozgatható mikroszerkezetek alkalmazása számos kutatási / fejlesztési területen reményteljes. Az alapvető kutatási területek mellett (kvantum-elektrodinamikai Casimir-effektus demonstrálása), kifejezetten izgalmas feladatokat ad a mikrofluidikai / mikroanalitikai rendszerekbe beépülő aktív eszközök (szelepek, pumpák, mikromotorok) megvalósítása, de nem feledkezhetünk el az esetleges opto-elektronikai alkalmazásokról sem (tükörmatrixok). Kifejezetten olyan területeket említettem, amelyek az MFA MEMS Laboratóriumának is kutatási vonalába esnek, és olyan szerkezeteket, amelyek megvalósítására a projekt keretein belül, illetve annak folytatásában erőfeszítések történtek / történnek.

Kiemelten fontosnak tartom a MEMS technológia felhasználásának kiterjesztését a nagy érdeklődésre számot tartó interdiszciplináris alkalmazási területek azonosításával. Laboratóriumunkban ehhez kapcsolódóan is jelentős infrastrukturális fejlesztések történtek, melyek oktatási – kutatási – termékfejlesztési felhasználására intézetünk az Integrált Mikro/Nanorendszerek Nemzeti Technológiai Platform (IMNTP) keretében koordináltan biztosít lehetőséget.

Szoros együttműködésben dolgozunk számos hazai kutatási centrummal (ATOMKI, BME, SE, PPKE, SZE, SZTAKI), ami a sikeres konzorciális pályázatok lehetőségét, illetve az interdiszciplináris kutatási irányok elérését is biztosítja. **Egyre nagyobb érdeklődés tapasztalható a terület iránt hallgatók részéről is, amit a nálunk dolgozó diplomamunkások növekvő száma is jelez.**

### Köszönet

Köszönetemet szeretném kifejezni az OTKA kollokviumnak a támogatásért, ami lehetőséget teremtett arra, hogy a posztdoktori kutatásaimat elkezdhessem, és önálló kutatási vonalat alakíthassak ki. Véleményem szerinte a PhD fokozat megszerzése után számos fiatal kutató szembesül azzal a problémával, hogy az eddigi témavezetői támogatás helyett önálló tudományos arculatot kell létrehoznia. Ebben lehet nagy segítségükre ez a pénzügyi támogatás, amely lehetőséget ad az első önálló szárnypróbálgatásokra.

Mindemellett köszönetemet kell kifejezzem a befogadó kutatóintézetnek, különösen korábbi témavezetőimnek Dr. Bársony Istvánnak, és Dr. Dücső Csabának, valamint a MEMS Laboratórium minden munkatársának.

**MELLÉKLETEK****A projekttel összefüggésben megjelent közlemények**

- [1] Cs. Dücső, I. Rajta, P. Fűrjes and E. Baradács, Silicon Check Valve made by Proton Beam Micromachining, Proceedings of 10th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications – ICNMTA2006, Singapore, 2006
- [2] Cs. Dücső, I. Rajta, P. Fűrjes, E. Baradács, Concept for processing of silicon check valves by proton beam micromachining, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 260, Issue 1, pp. 409-413, 2007 (IF 0,997)
- [3] P. Fűrjes, Z. Fekete, G. Lővei, I. Bársony, Thermally actuated valve system for multi-channel micro-fluidics, Proceedings of the MME 2009 Conference, Paper ID: 124, Toulouse, France, 2009
- [4] Deák András, Fűrjes Péter, Battistig Gábor, Bársony István: Integrált (nano)érezékelés az analitika szolgálatában, Magyar kémiai folyóirat, 115. évf. 1. sz., 2009
- [5] P. Fűrjes, Gy. Bognár and I. Bársony: Powerful tools for thermal characterisation of MEMS, Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 120 (1) pp. 270-277, 2006 (IF 2,083)
- [6] P. Fűrjes, Cs. Dücső, Zs. Vízváry, I. Bársony, Transient Heat Conduction Effects in Deformed Microstructures Proceedings of Eurosensors XX, vol. 2 pp 164-165, Göteborg, 2006, editor: P. Enoksson
- [7] P. Fűrjes, P. Csíkvári, Gy. Hárs and Cs. Dücső, Diamond Coated Micro-Heaters for MEMS, Proceedings of E-MRS 2007 Conference, p. Q-PII 9, 2007
- [8] P. Fűrjes, P. Csíkvári, I. Bársony and Cs. Dücső: "Micro-Hotplates for Thermal Characterisation of Structural Materials of MEMS, Proceeding of Thermic 2007 Conference, pp. 184-188, Budapest, Hungary, 2007
- [9] P. Fűrjes, P. Csíkvári, I. Bársony and Cs. Dücső: "Micro-Hotplates for Thermal Characterisation of Structural Materials of MEMS Microelectronics Journal, Volume 40, Issue 9, September 2009, Pages 1393-1397 (IF 0.609)
- [10] P. Fűrjes, I. Rajta, G. Battistig, I. Bársony and Cs. Dücső: Integrated Micro-Membranes by high energy He+ or H+ Implantation and Electrochemical Etching, Proceedings of Eurosensors XXII, Dresden, 2008
- [11] I. Rajta, Sz. Szilasi, P. Fűrjes, Z. Fekete and Cs. Dücső: Si Micro-turbine by Proton Beam Writing and Porous Silicon Micromachining Proceedings of 12th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications – ICNMTA2008, Debrecen, 2008
- [12] Rajta, Sz. Szilasi, P. Fűrjes, Z. Fekete and Cs. Dücső: Si Micro-turbine by Proton Beam Writing and Porous Silicon Micromachining Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 267 pp 2292-2295, 2009 (IF 0,997)
- [13] Z. Fekete, G.A.B. Gál, E. Baradács, I. Rajta, P. Fűrjes, Cs. Dücső: Integration of proton beam micromachining into MEMS technology for development 3D single crystalline silicon mobile microstructures, Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese, Hungary, 2009
- [14] Z. Fekete, P. Fűrjes, I. Rajta, Cs. Dücső, Characterisation of end-of-range geometric effect in complex 3D silicon micro-components formed by Proton Beam Writing, Proceedings of the MME 2009 Conference, Paper ID: 150, Toulouse, France, 2009
- [15] Z. Fekete, P. Fűrjes: Development of silicon-based microfluidic components by proton beam writing and using porous silicon sacrificial layer, Genius Europe Conference, Budapest, Hungary, 2009
- [16] Z. Fekete, P. Fűrjes, I. Rajta, E. Baradács, Cs. Dücső and I. Bársony: Hard coating of mobile 3-D silicon microstructures Proceedings of E-MRS 2009 Conference, Symposium : P: Protective coatings and thin films'09, p. PP4 2, Strasbourg, France, 2009

**Oktatás**

**Mikrotechnikai újdonságok (BMEVIEE916801) tárgy keretében** (16x2 előadás + 4x4 gyakorlat)  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, vezető oktató

**Mikro és nanotechnika** (2x2 óra előadás)  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - EET, Budapest (2009), MEMS szerkezetek tervezése

**Fizikai, kémiai és nanotechnológiák labor** (2x4 óra labor)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - ETT, Budapest (2009)

A félvezetőgyártás ábrakialakítási módszerei, Szilícium alapú mikrofluidikai eszközök technológiája

**Anyagtudományi Labor** (3x4 óra labor)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Budapest

**Kémiai és bioszenzorok** (1x4 óra labor)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Budapest

**Témavezetés: “Tanuljunk egymástól” Nyári Iskola középiskolásoknak  
(Oktatási és Kulturális Minisztérium - Kármán Tódor-díj az MFA részére)**

MEMS Technológiák és Eszközök – MFA MEMS Laboratórium

*Szakmai gyakorlat témavezetés:*

- **Gubán Dorottya** Komplex 3D egykristályos szilícium szerkezetek kialakítása kémiai eljárásokkal  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, vegyészmérnök szak
- **Csipak Árpád:** Aktív mikrofluidikai elemek tervezése, megvalósítása és optikai kiolvasásának fejlesztése  
Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológiai Kar
- **Bozsóki István:** Titán-nitrid vékonyréteg leválasztása  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikai Technológia Tanszék
- **Takács András:** Funkcionális mikrofluidikai rendszerek tervezése és kialakítása bioanalitikai célokra  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar

*TDK témavezetés*

- **Fekete Zoltán:** Szilícium alapú mikrofluidikai elemek fejlesztése protonnyalábos mikromegmunkálással és porózus szilícium áldozati réteg felhasználásával  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikai Technológia Tanszék, **XXIX. OTDK: III. helyezés**
- **Fekete Zoltán:** Development of silicon-based microfluidic elements formed by the combination of proton beam writing and porous silicon micromachining,  
**Genius Europe 2009, Diplomázók Nemzetközi Fóruma, I. díj**

*Diploma témavezetés*

- **Sidney Goiaime:** Design and formation micro and nanofluidic channels for solid-state nanopore sensors  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, vegyészmérnök szak (Dr. Gyurcsányi Róbert társvezetésével)
- **Fekete Zoltán:** Szilícium alapú mikrofluidikai elemek fejlesztése protonnyalábos mikromegmunkálással és porózus szilícium segédréteg felhasználásával,  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikai Technológia Tanszék, villamosmérnök szak
- **Lővei Gábor:** Casimir-Effect in nanotechnology  
Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológiai Kar, informatikus szak (Dr. Kádár György társvezetésével)
- **Takács András:** Funkcionális mikrofluidikai rendszerek tervezése és kialakítása bioanalitikai célokra  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar orvos-biológiai mérnök szak