

Válaszok Dr. Kiss Ádám, a fizikai tudomány doktora, bíráló észrevételeire, az általa feltett kérdésekre

Mindenekelőtt nagyon köszönöm a bíráló gondos munkáját, elismerő szavait és pozitív véleményét.

Feltett kérdéseire, észrevételeire a következő válaszokat adom:

Feltűnő és a szokásokkal ellentétes, hogy a dolgozat nem tartalmaz angol nyelvű összefoglalást.

A szabályzat szelleme alapján úgy gondoltam, hogy a magyar nyelv ápolása és a szaknyelv fejlesztése is az egyik deklarált célja annak, hogy az értekezés nyelve általában magyar (a XI. osztály külön előzetes engedély esetén elfogadja az angolt is). Az értekezés megírása előtt számos más dolgozatot tanulmányoztam, de csak kevés esetben láttam angol nyelvű összefoglalót. A dolgozatban közölt tudományos eredmények mindegyike megjelent nemzetközi (angol nyelvű) folyóiratokban.

Bíró megjegyzések:

- 1 *„Mégis a dolgozat javulását jelentette volna, ha a jelölt a rövid bevezető után külön fejezetben összefoglalta volna kutatásai eredményeit hasznosítani tudó szakterület fő jellemzőit, bemutatási és rendszerezési szempontjait.”*

Köszönöm a megjegyzést. Valóban hasznos lett volna egy ilyen külön fejezet beszúrása.

- 2 *„Az elért 200 nm-es nyalábméret impresszív eredmény, de vajon volna-e lehetőség még ezt is szűkíteni? Van-e olyan meghatározó környezete a kísérleti vizsgálati elrendezésnek, ahol elvileg még jelentős javulás érhető esetleg el?”*

Igen, van lehetőség a nyaláb méretének további javítására. A 200 nm nyalábméretet még 2018-ban értük el, a Tandetron Laboratórium 1. ütemében megépített (korlátozott méretű) nanoszondával. A 2. ütem megépítésével lehetővé vált az eredetileg 2012-ben már megtervezett rendszer megépítése, ezzel a nanoszonda elérte a végleges tárgy távolságot, ami mintegy 2-szeres javulás lehetőségét biztosítja.

Az effektív nyalábméretet azonban korlátozhatják a környezet mechanikai és elektromágneses rezgései. Ezekre vonatkozóan a gyorsító telepítési helyének kitűzése előtt rezgésméréseket végeztünk, ennek alapján döntöttünk az Atomki V. épülete mellett. (Ez az épület lehetővé tette a nanoszonda mellett a többi kutatási nyalábvég megépítését is, hiszen a gyorsító egy sokfelhasználós, multifunkciós nagyberendezés.) Időközben az épület egy része más funkciót kapott, ezért további vizsgálatok szükségesek annak érdekében, hogy így is fogjuk-e tudni biztosítani a szükséges feltételeket.

A PBW módszerrel készíthető struktúrák minőségét nemcsak a nyalábméret, hanem a nyalábáram stabilitása is jelentősen befolyásolja. Ezért nagyon fontos az, hogy az új Tandetron által biztosított áram lényegesen stabilabb, mint amit a Van de Graaff gyorsító tudott biztosítani.

- 3 „Kérem, hogy a védésen a jelölt mondja el gondolatait az általa alkalmazott és fejlesztett gyorsított részecskenyalábbal történő analitika, anyagmegmunkálás és a protonnyalábos írás alkalmazásának jövőjéről. Fejtse ki, hogy hogyan látja a kifejlesztett alkalmazások sorsát a jövőben, milyen irányban lát komoly kiterjesztési lehetőséget vagy új felhasználási alkalmazást, azért, hogy (ahogyan a szerző írja) „a következő évtizedekben kutató generációkat kiszolgálja”. Tekintve, hogy az alacsonyenergiájú, néhány MV típusú gyorsítók hosszú távú alkalmazását sokan az ilyen felhasználások körében látják, kiválthatja-e egy jövőbeni igény akár maguknak a gyorsítóknak, vagy ionforrásaiknak, nyalábvezető elemeinek jelentős fejlesztését?”

A szakterület legfontosabb nemzetközi konferencia sorozata a „mikroszonda konferencia” (ICNMTA, International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications). További jelentős konferenciák a következők: IBA, International Conference on Ion Beam Analysis; IBMM, International Conference on Ion Beam Modification of Materials; PIXE, International Conference on Particle Induced X-ray Emission; ECAART, European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology; CAARI, Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry. Az elmúlt időszak konferenciáin az előadások száma az egyes szekciókban jól jellemzi, hogy milyen irányba tart a nemzetközi közösség. Ezeket a trendeket megfigyelve a legjobbkor kezdtem el foglalkozni a PBW témával. Jelenleg pedig úgy tűnik, hogy a kvantumtechnológia területén lesz robbanásszerű fejlődés a következő évtizedekben. Erre utal David Jamieson plenáris előadásának címe is: „Einstein’s revolution: Quantum technology for the 21st century quantum computer”.

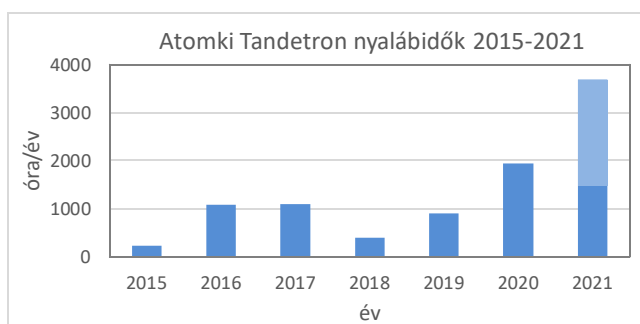
Napjainkban a régi gyorsítók fenntartása, üzemeltetése világszerte egyre nehezebbé vált, igény mutatkozott új elektrosztatikus gyorsítók építésére is. Ennek köszönhetően ma is működik, sőt fejlődik a világ két vezető gyorsítógyártó cége: a High Voltage Engineering Europa B.V. és a National Electrostatics Corporation. Az NEC ma is Pelletron rendszerű gyorsítókat gyárt, míg a HVEE a General Ionex céget felvásárolta és a szabadalmi alapján gyártja a Singletron és Tandetron gyorsítókat. Ezek legnagyobb előnye, hogy a nagyfeszültség előállítására nem használnak mozgó alkatrészeket, hanem egy nagy terhelhetőségű kaskád kapcsolást. Ezzel a megoldással nagy pontosságú, nagy stabilitású ionnyalábok állíthatók elő. A kutatásban és az iparban továbbra is van igény ezekre a gyorsítókra, ezt az a tény mutatja legjobban, hogy a HVEE cég olyan sok megrendelést kap, hogy a gyártási kapacitásának bővítése ellenére csak elég hosszú határidőre vállalnak új szerződéseket. Ezek a témák az ionnyaláb-analitika mellett az ionnyalábokkal végzett anyagmódosítás és a félvezetők implantálása.

Egy példa arra, hogy a gyorsítófejlesztés megoldást ad a gyorsítókkal kapcsolatos felhasználói igényre. A nyaláb jobb fókuszálása érdekében nagyobb intenzitású, fényességű ionforrásra van szükség. A cusp/multicusp elv már régóta ismert [K.W. Ehlers and K.N. Leung, *Multicusp negative ion source*, Rev. Sci. Instrum. 51 (1980) 721]. A Jyväskyläi Egyetemen először 2000-ben építettek egy multicusp ionforrást a ciklotronhoz [<https://www.jyu.fi/science/en/physics/research/infrastructures/research-instruments/ion-beam-research/liisa>], később egy másikat az 1.7 MV Pelletron tandemhez is. A multicusp ionforrások nemcsak nagy (mA) áramokat tudnak biztosítani, hanem – ami a mikro- és nanoszondák szempontjából a legfontosabb – extrém nagy fényességű nyalábokat is tudnak szolgáltatni (ezt a kétféle nyalábjellemzőt nem feltétlenül ugyanazokkal a beállításokkal lehet elérni). A HVEE cég kifejezetten a Tandetron gyorsítókhöz, ezek mikro- és nanoszonda alkalmazásaihoz kezdte gyártani a multicusp ionforrásokat [J. Visser, et al, *Considerations on accelerator systems requirements and limitations for μ -probe applications*, NIMB 231 (2005) 32; és

P. Pelicon, et al, *A high brightness proton injector for the Tandetron accelerator at Jožef Stefan Institute*, NIMB 332 (2014) 229]. A ljubljana-i rendszer után már Fokvárosban (iThemba LABS), az Atomkiban, és néhány ipari megrendelőnél is működik ilyen ionforrás (ez utóbbiakról azonban érthető okokból nem sokat lehet tudni).

A bíráló által idézett mondattal nem csak az IBA/IBMM/PBW témájú alkalmazásokra utaltam, hanem arra is, hogy az 50 évig kiváló szolgálatot teljesítő Van de Graaff gyorsítóhoz hasonlóan az új Tandetron esetében is hasonlóan hosszútávú felhasználás várható. Erre az alapkutató felhasználók meglévő – jó nyalábminőség iránti – igényei mellett egyre nagyobb érdeklődés várható (és már érezhető) az ipari felhasználók részéről is. Mind az alap kutatásban, mind az ipari alkalmazásokban bármikor jöhetnek olyan – előre nem tervezett – új igények és témák, amelyek műveléséhez fontos, hogy rendelkezésre álljanak az ilyen energiatartományt lefedő részecskegyorsítók. (Az ezeknél sokkal nagyobb gyorsítókat már általában csak nemzetközi összefogásban építenek, de a miénk még a nemzeti laboratórium szintje.) Az elmúlt évtizedekben az egyik ilyen új téma volt a nukleáris asztrofizika.

A Tandetron gyorsító által szolgáltatott nyalábidő az elmúlt néhány éves üzemelése alatt a következőképpen alakult. (Megjegyzés: a grafikonon a 2021. év esetén a 2. félévre beadott igények alapján becsült értékeket világosabb színnel tüntettem fel.)



Ebből látható, hogy a kezdetek óta az első 3 évben megépített négy nyalábsatornán megjelentek a felhasználói igények. 2018-ban azért volt kevesebb nyalábidő, mert ebben az időszakban történt a GINOP projektünk keretében a végleges konfiguráció kialakítása. A 9 kimenettel rendelkező kapcsolómagnesre most már 7 nyalábsatorna épült fel: kihozott nyaláb (B45°), nukleáris asztrofizika (B20°), mikroszonda (0°), nanoszonda (J10°), NEC analitikai nyalábvég (J20°), Europlanet ICA Ice Chamber for Astrophysics-Astrochemistry (J30°), magfizikai nyalábvég (J45°). Ezekre összesen olyan sok nyalábidő-igény érkezett, hogy a teljesíthető kapacitás határán állunk. A jövőben ez a trend valószínűleg még tovább fokozódik, emiatt nem marad más megoldás, mint a nyalábidő éjjel-nappali felhasználása.

Részletes megjegyzések, kérdések:

- „A dolgozatban többször emlékeztem a Szingapúri Egyetem, illetve a cseh rezi intézetekben végzett munkájára és ott elért eredményeire. Az azonban a disszertációból nem derül ki, hogy hogyan, hányszor, mennyi ideig és milyen minőségben dolgozott az említett intézetekben. Kérem, a védésen fejtse ezt ki!”

A Szingapúri Egyetemen 2001-ben 10 hónapig voltam posztdoktori állásban. Az ezt megelőző posztdoktori éveimhez képest ez az időszak volt a legeredményesebb, ehhez számos cikk is kötődik, és innen hoztam haza magammal a mikromegmunkálás témát.

Csehországban a Cseh Tudományos Akadémia řez-i magfizikai intézetben néhány akadémia-közi bilaterális projekt keretében töltöttem több alkalommal rövidebb időket (kb. 5-ször egy-egy hét).

- *A 1. és 2. ábrákon látható a Szingapúri Egyetem Gyorsítólaboratóriumának (CIBA) alaprajza 2001-ben és 2017-ben. Az összehasonlítás természetesen mutatja a fejlesztéseket.*
 - *Mi volt a szerző szerepe a szingapúri fejlesztések átgondolásában, és/vagy megvalósításában?*

Néhány szó az előzményekről: Frank Watt és Geoff Grime együtt fejlesztették ki Oxfordban a mikroszondát a 80-as években. Ennek nemzetközi sikerére alapozva hozták létre Oxford Microbeams Ltd. néven a cégüket (az ilyen cégeket ma már spin-off cégeknek nevezzük). Tőlük rendelte meg Koltay Ede 1992-ben az Atomki számára az A080 számú OTKA műszerközpont projekt keretében a mikroszonda legfőbb egységeit. Én Kiss Árpád Zoltán témavezetésével 1993-tól lettem PhD hallgató, ennek részeként 1994-ben 3 hónapot töltöttem Oxfordban, ahol Geoff Grime-től tanulhattam. Hazatérésem után itthon megépítettük a mikroszondát, ennek eredményei alapján készült el a PhD dolgozatom. 1997-ben és 2000-ben egy-egy évet töltöttem Oxfordban posztdoktori álláson.

Frank Watt 1992-ben került Szingapúrba, ahol egy régi 2 MV-os Van de Graaff gyorsító és egyetlen PIXE célú nyalábcsatorna volt. A régi gyorsító mellett egy teljesen új, modernebb, nagyobb alapterületű, új HVEE Singletron gyorsítóra alapozott labort hozott létre, és Oxfordi eredményeim alapján hívott meg 2000-ben, hogy csatlakozzam a szingapúri csoportjához. Ekkor már ez a labor volt a világ legjobb mikroszonda laborja.

2001-ben a legjobbkor csatlakozhattam a szingapúri csoporthoz, ugyanis ebben az évben sikerült elérnünk – nagy mértékben az általam kidolgozott, az eredeti instrukciókhoz képest számos ötlettel továbbfejlesztett finomhangolási eljárás eredményeképpen – az akkor világrekordnak számító 35 nm nyalábméretet.

- *Mit jelent „a 2. generációs PBW nyalábvég” és mit a „biológiai minták mikroszkópiájára” alkalmas nyalábvég?*

A 2001-ben megépített nanoszondát elsősorban „mikromegmunkálásra” használták. Pontosabban mivel nanométeres nyalábmérete volt, így nanomegmunkálásnak kellene nevezni. Éppen ez volt az oka annak, hogy bevezették a PBW (Proton Beam Writing, P-beam Writing kifejezést.) A következő években a nanoszonda építésénél szerzett tapasztalatokat kihasználva több új nyalábcsatornát is építettek, amelyek ugyanazt az ionoptikai konfigurációt használták, mint az első nanoszonda. Ezek a céltárgy vákuumkamra kialakításában és felszerelésében (detektorok, optikai mikroszkópok, stb.) különböztek az elsőtől. Ezért nevezték el a fenti módokon a két új nyalábvéget.

- *A szingapúri laboratóriumra vonatkozik az 1. és 2. táblázat. Mekkora az ott megadott ionoptikai paraméterek hibái? Mekkora a megadott nyalábméret-paraméterek hibái?*

A táblázatokban szereplő paraméterek a PRAM ionoptikai programmal végzett számításaim eredményei (<https://www.ph.unimelb.edu.au/marco/manuals/pram-manual.pdf>). A programot David Jamieson fejlesztette ki, aki előttem volt oxfordi posztdoktor, jelenleg a Melbourne-i Egyetem professzora és 2008-2013 között a Fizikai Intézet vezetője volt. A program nem számolja ki a paraméterek hibáit, ezért ezeket nem tudtam a táblázatokban feltüntetni.

A mérési eredmények a számított értékekkel jó egyezést mutattak, a legegyszerűbb ellenőrizni a kicsinyítési tényezőt. A nyalábméreték hibáit a mérési eredmények esetében meghatároztam, és feltüntettem (Szingapúr 4. és 5. ábra, Řež 7. és 8. ábra, Atomki 14. és 15. ábra).

Az Atomki nanoszonda megtervezéséhez kezdetben szintén a PRAM kódot használtam, a későbbi ionoptikai számításokat már Geoff Grime WinTRAX programjával végeztem (<http://www.microbeams.co.uk/download.html> #WinTRAX – Raytracing simulation of microbeam systems), mert ez egy lényegesen fejlettebb szoftver.

- *Megítélésem szerint nem lett volna nehéz a 9. ábra szerinti 2,8 MeV alatti spektrumrészt kiértékelni. Mit jelent az, hogy a 2,14 – 2,8 MeV közötti energiatartományban a „laborhátér interferenciát okoz”?*

Igen, ez is kiértékelhető lett volna. Ebben az energiatartományban néhány csúcs a vizsgált magreakció eredménye (R/DC \rightarrow 7029, 2312 \rightarrow 0, 6445 \rightarrow 3948, R/DC \rightarrow 6445). Az említett csúcsok alatti háttér a 2614 keV energiájú laboratóriumi háttércsúcsnál kisebb energiáknál megnő, ami kis gamma-hozamok esetén zavaró lehet. A 2,8 – 9,5 MeV energiák közötti tartományban (szürkével jelölt terület) ez a zavaró hatás nem jelentkezik. Ráadásul mivel ez a tartomány jóval nagyobb, mint a 2,14 – 2,8 MeV közötti, így még igen kis gamma-intenzitások esetén is jó statisztika várható. A laboratóriumi háttér hatása természetesen csak 2,6 MeV alatt jelentkezik, így a „2,14 – 2,8 MeV közötti energiatartományban a laborhátér interferenciát okoz” szövegrész elírás, amiért elnézést kérek.

A Bg 2614 és az R/DC \rightarrow 6445 csúcsok között (kb 2670 keV-nél) lehetett volna a vágást alkalmazni a 2,8 MeV helyett. Ezzel egy releváns csúcsot még belevehettünk volna a kiértékelésbe. Viszont azt nem akartuk megkockáztatni, hogy az elektronika esetleges csúszásával belekerüljön az érdekes tartományba a laboratóriumi háttércsúcs is.

- *A 24-ik és következő oldalakon a kétdetektoros PIXE rendszert mutatja be a szerző. A 19. ábrán egy példát mutat be arra, hogy milyenek az ultra vékony ablak melletti PIXE detektorban és a másik Be ablakú, alumínium szűrővel ellátott detektorral ugyanabban a mérésben felvett spektrumok. Az ábrából világosan látszik, hogy a Ca és a Fe közötti energiatartományban mind a két detektor működött. Azonban a tényleges elrendezés és a mátrixhatások különböznek a két detektorra. Milyen azonosságokat és különbségeket tapasztalt a jelölt a két tartomány külön-külön történt kiértékelése után? Mekkora volt a különbség az egyes elemek kiértékelésekor kapott eredményekben a két detektorban?*

A kétdetektoros PIXE módszer kifejlesztése óta igen sok mérést végeztünk különböző mintákon. (Mivel azonban én személyesen az utóbbi időben az analitika helyett sokkal többet foglalkoztam a PBW témával, ezért inkább a csoport fiatalabb tagjai végeztek több ezer ilyen mérést.). Általában szignifikáns eltérést nem észleltünk a két detektorral szimultán kapott eredmény között. A különbség többnyire 10 relatív %-on belül volt. A kiértékelést régebben mindig a PIXEKLM program-csomaggal végeztük (ma már gyakran használjuk a GUPIX kódot is). A két detektorra kapott eredményt mindig összenormáljuk valamely Ca és Fe közötti olyan elemre, ami nagy koncentrációban van jelen a mintában. Ennek eredményeképpen az átfedő elemtartományban a többi elemre is konzisztens értékeket kapunk. A jelen esetben egy kb. 1 mm széles kobaltkék üvegcsík közepén végeztük a méréseket, emiatt ebben az esetben a két detektorral kapott eredmény jól megegyezett.

A bíráló által felvetett probléma akkor merül fel súlyosabban, ha a minta extrém inhomogenitásokat tartalmaz, illetve, erősen és durván szemcsézett szerkezetű. Ilyen esetekben természetesen felléphetnek nagyobb különbségek is a két detektor által kapott eredmények között, viszont ezeket már egyedileg kell megvizsgálni/tanulmányozni, ugyanis a PIXEKLM program csak vékony, vagy homogénnek tekinthető vastag, illetve homogén szemcséket (nagy 20-100 mikronos, illetve kis gömböket) tartalmazó mintákra volt optimalizálva. A PIXEKLM program a mátrixhatást, a detektorok geometriáját, az alkalmazott filtereket az elemi összetétel meghatározásnál figyelembe veszi. Mindkét detektor 135° szöveget zárt be a nyalábbal, a minta felületére merőlegesen esett be a nyaláb, így a két detektor esetében a mátrixhatások azonosak voltak.

- *A 3.2 fejezetben a jelölt a hatékony töltés-monitorozásról ír: Végkövetkeztetésében eljut oda, hogy a szekunder elektronemisszió mérése hatékony módszer a megfigyelésekre. A 36. ábrán kísérleti eredményeket mutat be négy különböző mintára. Mit mutatnak pontosan az ábrán látható, a mérési pontokat összekötő vonalak? Ezek illesztések eredményei? A 37. ábra már más képet mutat. – Összegezve: melyek azok a körülmények, amelyek mellett a szerző által kidolgozott módszer megbízhatóan alkalmas hatékony töltésmonitorozásra? Hol vannak az alkalmazhatóság határai?*

A 36. ábra azt bizonyítja, hogy az elektronemissziós hozamok a besugárzó protonfluens függvényében lineárisak voltak a vizsgált fluens tartományban. A mérési pontokat összekötő vonalak valóban illesztések voltak. A minták az ábrán látható négy esetben szilícium hordozón lévő SU-8 rétegek voltak. A vékonyabb rétegeken kissé magasabb volt az elektronemissziós hozam. Az egyik Si hordozót az SU-8 réteg felvitele előtt Ni vezetőréteggel vontuk be. Ezen a mintán az elektronemissziós hozam kicsivel kisebb lett, mint az azonos rétegvastagságú Ni nélküli mintán. Tehát a felület alatt 20 µm-rel lévő vezetőréteg befolyásolja a felületi emissziós folyamatokat.

A 37. ábrán az elektronemissziós hozamok a 10 µm vastag SU-8 mintán láthatók különböző energiájú protonok esetén. A görbe nem-lineáris ~1,6 MeV energia alatt, ami valószínűleg a minta töltődése miatt van így. [Ez az energia a fékeződés skálán ~2,2 eV/(10¹⁵ atom/cm²)-nél nagyobb értékeknek felel meg.]

Ezek alapján tehát a módszer akkor alkalmazható, ha a minta vékonyréteg polimer vastag Si hordozón (de ugyanígy jól működik vezetőréteggel bevont üveg hordozón is). A réteg vastagságának kisebbnek kell lenni az ionok behatolási mélységénél (azaz ne a rétegben, hanem a vezető/félvezető hordozóban álljanak meg). A behatolási mélységnél vastagabb polimer réteg (és tömbi szigetelő) minták esetén sajnos ez a módszer nem használható.

- *A jelölt tézispontjai között szerepel a CR-39 néven ismert poliallildiglikol-karbonát, az Atomki munkatársai által régóta radondetektálásra használt anyag elsőként való alkalmazása PBW célokra. Kérem, hogy hasonlítsa össze ennek az anyagnak a jellegzetes tulajdonságait a PMMA polimer és a Foturan üveg hasonló, protonnyaláb írási célokra történő felhasználásával kapcsolatban! Mennyiben jelent előnyt a CR-39 anyag alkalmazása PBW célokra és fejtse ki, hogy mikor érdemes ezt az anyagot használni!*

A Foturannal ellentétben a CR-39 olcsó, könnyen beszerezhető. A PMMA szintén olcsó, de a CR-39 mindkét másik anyaghoz viszonyítva kevésbé agresszív vegyszerekkel hívható elő, ezért használata kevésbé terheli a környezetet.

Legújabb méréseink során a CR-39 anyagot újra elővettük, és a H2020 RADIATE projekthez kapcsolódóan megmutattuk, hogy egyedi ionok detektálására is alkalmas. A projektben a „Single ion detection” (Task 21.1) feladatunk éppen erről szól. Ebből az új témából publikáció még nem készült, előkészítés alatt áll.

- *Bravúros eredménynek tartom, hogy sikerült megvalósítani a világon az első mozgó alkatrészt tartalmazó mikroturbinát. Mi volt az élettartama az elkészített eszköznek? Volt-e rá lehetőség, hogy más hasonló eszközt is megtervezzenek? Lehetett-e elméletileg követni a rendszerben kialakuló áramlástanai viszonyokat hidrodinamikai modellek segítségével?*

A mikroturbinát csak a PorSi-PBW technika lehetőségeinek bemutatására terveztük és állítottuk elő egy OTKA projekt keretében és nem volt olyan követő projektünk, amiben a gyakorlati alkalmazást céloztuk meg. Ennek megfelelően nem vizsgáltuk a tartós működést, és a kísérletek, ill. bemutatók során összesen 2-3 órán át működtettük a rendszert.

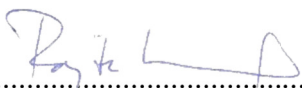
A hasonló mikroturbinát tartalmazó eszközök főképpen felületi mikromechanikával készülnek(tek), ami a technológia jellemzője miatt polikristályos, rétegleválasztással készített anyagokból állnak. Ezek mechanikai tulajdonságai korlátozottak, így az általunk alkalmazott kristályos Si már önmagában is javulást jelent az élettartamot tekintve. Ez még növelhető kemény bevonat alkalmazásával, amihez mi CVD bevonatokat teszteltünk [pl. poly-Si, SiNx, UNCD (ultrananokristályos gyémánt)]. Ezek közül természetesen az UNCD volt a legjobb keménységű, de a bevonat konformitása korlátozott volt – erre lehet megoldás az ALD TiN réteg alkalmazása. (Ld. Z. Fekete, P. Fürjes, T. Kárpáti, G.A.B. Gál, I. Rajta: *MEMS-compatible hard coating technique of moveable 3D silicon microstructures*, Materials Science Forum 659 (2010) 147-152.)

Más hasonló eszközt is terveztünk, és készítettünk, bár ez inkább csak a koncepcióig, és néhány próbakísérletig jutott el. (Ld. Cs. Dücső, I. Rajta, P. Fürjes, E. Baradács: *Concept for processing of silicon check valves by proton beam micromachining*. Nucl. Instr. Meth. B 260 (2007) 409-413.)

Fordulatszám-mérés (detektálás): Az MFA együttműködők BME hallgatóikkal egy ötletes megoldással készítették hozzá egy demo fordulatszám mérőt. Kellott hozzá egy fényforrás, lencse, és detektor. Mindezt egyben biztosítja egy DVD író-olvasó fej.

Modellszámítások is készültek véges elem módszerrel (finite element method, FEM): ez azonban mozgó alkatrészek esetén nagyon erőforrás igényes. Az együttműködés és a cikkek írásának idején még csak álló statikus rendszerek modellezésére volt lehetőség a korlátozott számítási kapacitás miatt. A mai programok már jobban működnek, de a megoldás, még mindig nem triviális – a Navier-Stokes egyenlet megoldása mozgó hálón nagyon korlátozott esetekben vezet használható megoldásra.

Debrecen, 2021. augusztus 30.



Rajta István