

**Bírálat Rajta Istvánnak az MTA doktora cím elnyerésére benyújtott  
„Mikromegmunkálás és ionnyaláb-analízis pásztázó ionszondákkal”  
című disszertációjáról**

Rajta István kutatói tevékenysége összefonódott a debreceni pásztázó ionszondák fejlesztésével és alkalmazásával. PhD hallgatóként kapcsolódott be a korai szondák kialakításába, azóta is az egyre újabb és egyre jobb szondák kifejlesztésével és alkalmazási körök kiszélesítésével foglalkozik. Doktori disszertációja e folyamat során elért eredményeinek összefoglalója. A debreceni bázisú kutatás szorosan kapcsolódott néhány elsőrangú külföldi releváns helyszínen, elsősorban a Szingapúri Egyetem Fizikai Intézet világszínvonalú laboratóriumában végzett munkájához.

A dolgozat terjedelme 117 oldal. Szerkezete alkalmazkodik a mű tematikai felosztásához. Egy 3 oldalas bevezető után következik négy, nagyban független egység, ez adja a mű struktúráját. E négy rész a négy markánsan elkülönülő rész-területet képviseli: Az első rész az ionnyalábok létrehozásával az egyre jobb mikro és nanoszondák építésével, beállításával, optimalizációjával foglalkozik. Ezt követi az ionnyalábok analitikai felhasználásában (IBA) elért eredményeket taglaló nagyobb fejezet. Ezután a protonnyaláb írásos módszer (PBW) fejlesztésével foglalkozik, ez magában foglalja néhány új rezisztanyag felhasználását e területen. Az utolsó, negyedik szakasz a protonnyaláb írásos módszer új alkalmazásait mutatja be, ezek két és három dimenziós mikrostruktúrák, amelyeket az integrált optika és a mikrofluidika területén alkalmaz.

Szerteágazó tehát a pályázó tevékenysége, az ionnyaláb technika valamennyi szegmensére kiterjed. Az alábbiakban kiemelek az egyes területeken elért általam leglényegesebbnek tartott eredményeket.

Nagyon alapos az első, ionforrás építő munka leírása. Részletesen bemutatja egy szingapúri, egy prágai és egy debreceni berendezés fejlesztését. E leírások nyilvánvalóan nagyon intenzív és magas színvonalú fejlesztést takarnak. A fejlesztés általában arra irányul, hogy egyre nagyobb intenzitású ionnyalábokat hozzon létre egyre jobb fókuszálással. Ehhez új forrásokat, új fókuszáló mágneseket kell megismerni, használatukat optimalizálni. A jelölt innovatív új eljárásokat talált ki a nyaláb jellemzésére, a fókuszálás javítására. Ezek során komoly eredményeket ért el: a mérések idején világrekordnak számító kis átmérőjű és nagy intenzitású nyalábokat állított elő protonokkal illetve más ionokkal is. Az egyes fejlesztési lépések kihívásai mellett gyakran túlzott alapossággal leírt műszaki részletek kötik le az olvasó energiáját. Nem világos, miért kell e műben közölni, hogy pl. a prágai kiépített laboratóriumban a mikroszonda közel van az ajtóhoz, és a nyalábvégénél nagy a zaj (6. ábra).

A következő rész az ionnyalábok analitikai felhasználását, az e területen elért eredményeket részletezi. Lényeges eredmény, hogy a protonokkal vagy deutronokkal indukált gamma-emissziót (DIGE) megvalósította fókuszált ionnyalábok alkalmazásával, létrehozván a micro-DIGE módszert. Ezzel számos elem egyidejű kimutatása lehetséges nagy térbeli feloldással. Szellemes eljárást dolgozott ki a nanokapillárist tartalmazó anyagokban a nanokapillárisok irányeloszlásának a meghatározására – ez az ionnyalábokra vonatkozó átlátszóság irányfüggésén alapul.

A harmadik nagy egység a proton sugár írás témakörére vonatkozik. Magától értetődő felhasználása a kis átmérőjű ionnyaláboknak a mikromegmunkálás. A pályázó e területen a frontvonalban dolgozott. Az eljárás kialakulásának korai szakaszában is része volt a folyamatnak, a név (Proton Beam Writing – PBW) kialakulásának is részese volt. Az ide vonatkozó eredmények új, az eddig általánosan használtaknál jobb minőségű tesztmintákat készített polimer mikrostruktúrák galvanizálásával - ezekkel a nyalábtulajdonságokat lehet nagy pontossággal mérni. Ugyancsak kiemelendő eredmény e területen új anyagok bevonása a PBW (és az besugárzást követő maratásos előhívásos) technika által megmunkált anyagok körébe: ezek a CR-39 és a Foturan-üveg. Meghatározta az ezen anyagokra vonatkozó besugárzási paraméterek tartományát.

A negyedik terület az alkalmazásokban elért eredményeket mutatja be. Ezekben a munkákban tehát a PBW eljárással létrehozott alakzatok konkrét, egyéb területen felhasználható eszközöket eredményeznek. Az integrált optika és a mikrofluidika területére vonatkoznak az ilyen irányú fejlesztések. Kimutatta, hogy proton besugárzás hatására nő egyes anyagok, pl. a PMMA, ill a PDMS törésmutatója, és e hatásra alapozva proton besugárzásával lineáris optikai fényvezetőt hozott létre. A vezető tulajdonságát a besugárzás paramétereivel hangolni tudta. E vezetőkből összetett optikai eszközt, Y csatolót is létrehozott, ezt optikailag tesztelte is. Azt is kimutatta, hogy a besugárzás a PDMS-ben tömörödést is okoz, és e hatást kihasználva mikrolencsákat is készített, és ezek optikai tulajdonságait is meghatározta. A PBW technikával 3 dimenziós mechanikai szerkezetet is létrehozott. Ügyes sorrendű, különböző mélységű besugárzási-marási lépésekkel olyan eljárást fejlesztett ki, amellyel háromdimenziós, a környezetétől részben vagy egészben leválasztott testeket tudtak csinálni. Látványos demonstrációként rögzített tengelyen forgó turbinát készítettek. E bonyolult mozgó szerkezet újdonságát jelzi, hogy a szakterület reprezentatív folyóiratának címlapjára került. Együtműködésben mikrofluidikai eszközt szerkesztett vérben szállított rákos sejtek szeparációjára. Az eszköz lényege, hogy egy kamrában oszlop-erdő áll az áramlás útjában, és ezek megfelelően bevont nagy összes felületén kitapad a kiválasztott sejt. A besugárzott minta megdöntésével ferde oszlopokat hozott létre a mikrofluidikai kamrában: felváltva jobbra illetve balra döntött oszlopsorok követik egymást, e struktúra a feltételezések szerint segíti a sejtek kitapadását.

A felsoroltak mutatják, hogy a pályázó az ionnyaláb technika minden releváns területén számottevő eredményeket ért el. A munka egészéről elmondható, hogy a tartalom jelentős részben műszer építés, fejlesztés és működés optimalizáció, de természetesen e szinten ez

komoly tudományos teljesítményt képvisel. Az eredményeket a terület reprezentatív folyóirataiban közölte - érdekes viszont, hogy a mű alapját képező közlemények 70%-a egyetlen helyen, a „Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B” folyóiratban jelent meg.

A dolgozat szép kiállítású, kevés az elírás, vagy a szerkesztési hiba. Viszonylag könnyen olvasható a szakterülethez nem túl közeli bíráló számára is, bár eléggé megterhelő a technikai részletek alapos és nagyon kimerítő taglalása – ez végigkíséri a dolgozat lényegi részét.

A disszertáció olvasása közben felmerült kérdéseim, megjegyzéseim a következők:

Az 55. oldali 43. ábrán csupa hasonló oszlop alakzatot látunk. Ezeket hol köröknek, hol korongoknak hívja. Jól gondolom-e, hogy ugyanarról a geometriáról van szó?

Ugyancsak az 55. oldal végén ír arról, hogy a PBW eljárás lassú a tömegtermeléshez. Mégis, milyenek a tipikus sebesség-értékek, mennyi ideig tart egy minta elkészítése? Még ha nagyon paraméter-függők is az ilyen értékek, jó volna kapnunk egy jellemző értéket.

A 61. oldal 46. ábráján PMMA-ban illetve FOTURAN üvegben létrehozott azonos geometriájú integrált optikai gyűrű rezonátort mutat. Az egyiküknél a gyűrű összeér a becsatoló lineáris vezetővel, a másikonál nem. Erről a jelölt azt írja: “Kisebb nyalábmérettel besugározva valószínűleg mindkét anyagban különváltak volna a struktúrák.” Ez teljesen nyilvánvaló, a besugárzási-előhívási paramétereket hangolva nyilván elérhető lett volna a megfelelő szeparáció. Ráadásul, egy ilyen gyűrű rezonátor érdekes és fontos integrált optikai elem, érdemes lett volna nem csak egyetlen próba rajzolást végezni, hanem kicsit több ráfordítással működő elemet készíteni.

A 74. oldalon optikai hullámvezető rajzolását írja le, Y fényosztó elemet készített. A vonal hullámvezetőben a vezetés ott valósul meg, ahol a törésmutató növekedés a legnagyobb, vagyis a fékezési út végén, ami ez esetben az 53. ábra példáján kb. 40  $\mu\text{m}$  mélyen van.. Méri a tömörödést is, ezt a felület AFM pásztázásával tudja megtenni, néhány 100 nm adódik, vagyis nem hat a hullámvezetőre. Ezért azt mondja, a PMMA felületének módosítása nem hat a hullámvezetőre. Miért is hatna maga a felület? Mire gondol itt?

A 79. oldalon leírja, hogyan határozta meg a besugárzott PMMA törésmutató mélység-profilját. Vagy a minta elé tettek egy 50  $\mu\text{m}$ -es fóliát, vagy nem, illetve a besugárzási energiával hangolták tovább a behatolási mélységet. Így kapta a meglehetősen zajos 56. ábra adatait. Nem lett volna-e egyszerűbb és pontosabb meghatározni a mélységi profilt, hogy egyetlen (vagy kisszámú) mintát vesznek, majd vékony rétegekben lecsiszolják a felületet, és ugyanolyan ellipszometriai méréseket végeznek. Tudta volna polírozni, hiszen a fény ki-be csatolását is a polírozott oldalakon oldotta meg.

A 79. oldalon írja le, hogy PDMS-ből is készítettek hullámvezetőt, illetve ebben is meghatározták a törésmutató növekedés részleteit. A fényvezetőt magát az 59. ábrán látjuk – az ábra egy téglalapot mutat két verzióban. Nem látszik itt, milyenek a méretek, milyen a mélységi profil, „hol van” a fényvezető, mitől ilyen szép téglalap a keresztmetszete.

A 84. oldalon olvasható egy kvalitatív magyarázat arra, miért függ egyes besugárzott csíkok tömörödése a csíkok szélességétől és sűrűségétől a gumiszerű rugalmas PDMS anyagban. A magyarázat hihető, de azért ezt a jelenséget szimulálni lehetett volna COMSOL programmal.

A 89. oldalon leírtak szerint a besugárzást követő tömörödést kihasználva konvex lencsét készített PDMS-ből. A lencsét döntően a besugárzott gyűrű zsugorodása által okozott rugalmas alakváltozás (kipúposodás), hozza létre. Nem gondoltok-e azon, hogy a PDMS minta nyújtásával változtassák a fókusztávolságot, és így érdekes tulajdonságú optikai eszközöket készítsenek?

99. oldal: Mikrofluidikai eszközt szerkesztett vérben szállított rákos sejtek szeparációjára. Az eszköz lényege, hogy egy kamrában oszlop-erdő áll az áramlás útjában, és ezek megfelelően bevont nagy összes felületén kitapad a kiválasztott sejt. A besugárzott minta megdöntésével ferde oszlopokat hozott létre mikrofluidikai kamrában: felváltva jobbra illetve balra döntött oszlop sorok követik egymást. Azt írja, hogy a ferdeség miatt megnövekedett felület, és a ferde oszlopok körül kialakuló sajátos áramlás segíti a kitapadást. Szerintem csak a második hatás, azaz a sajátos áramlási profil lehet jelentős – ezt sajnos a disszertációban nem részletezi, pedig érdekes lenne -, hiszen a ferdeség miatti felület növekedés mindössze 6 % az alkalmazott 20°-os dőlés esetén, elhanyagolható.

E kérdések, megjegyzések a dolgozat megítélését nem befolyásolják.

Kijelentem, hogy a mű hiteles adatokat tartalmaz, alapját releváns nemzetközi szakmai folyóiratokban megjelent jól idézett cikkek alkotják. Valamennyi tézispontot elfogadom. Mindezek alapján a doktori művet nyilvános vitára alkalmasnak tartom.

Szeged, 2021. június 30.

Ormos Pál

OrmosPál

