

Válaszok Dr. Ormos Pál, az MTA rendes tagja, bíráló észrevételeire, az általa feltejt kérdésekre

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

Feltett kérdéseire, észrevételeire a következő válaszokat adom:

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?

Igen, jobb lett volna egységes megnevezést használni.

A besugárzási mintázatok – jellegük miatt 2D alakzatok – ebben az esetben körök voltak. Ezért a létrehozott 3D struktúrák hengerek lettek. A kis magasságú, ehhez képest nagy átmérőjű hengereket korongoknak neveztem. Más esetekben nagy oldalarányú struktúrákat is készítettünk, ezeket a hengereket oszlopoknak is nevezhetjük (nagy magasság, kis átmérő).

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.

Valóban egy minta elkészítése sok paramétertől függ. Maga a nettó besugárzási idő tipikusan néhány perc, bonyolultabb struktúrák vagy nagy fluensek esetén elérhet egy órát is. Többféle energia esetén az energiaváltás (nyalábvezetés, fókuszálás, mintapozicionálás) is órás nagyságrendű időt igényel. A minták előkészítése, vákuumozás, majd a besugárzás után az előhívás is jelentős időt vesz igénybe (magánál a besugárzásnál sokkal többet). Sőt a tervezés, és a kész minták minőség-ellenőrzése is időbe telik.

A besugárzási időt a kísérleti paraméterek segítségével egyszerűen számolhatjuk. Pl. 10^{14} ion/cm² tipikus fluens és 1 mm² besugárzott terület 160 nC töltést igényel. Ezt 100 pA áram használatával 1600 s (vagyis ~27 perc) idő alatt tudjuk besugározni. Gyakran a besugárzandó terület ennél lényegesen kisebb. A terület ismeretében tervezhetünk kisebb vagy nagyobb áramot vagy fluenst a lehetőségeken belül. A tipikus áram értékek 1 pA és néhány nA között vannak, ez még a nyalábmérettől is függ. Ebből következik, hogy az áramot úgy érdemes megválasztani, hogy a besugárzási idő ne legyen túl hosszú, de túl rövid sem. A több órás besugárzás nem lenne gazdaságos, a túl rövid pedig megnehezítené a besugárzási idő pontos mérését. (Pl. egy besugárzás nem tarthat 1 μs ideig.)

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 rajzolatát végezni, hanem kicsit több ráfordítással működő elemet készíteni.

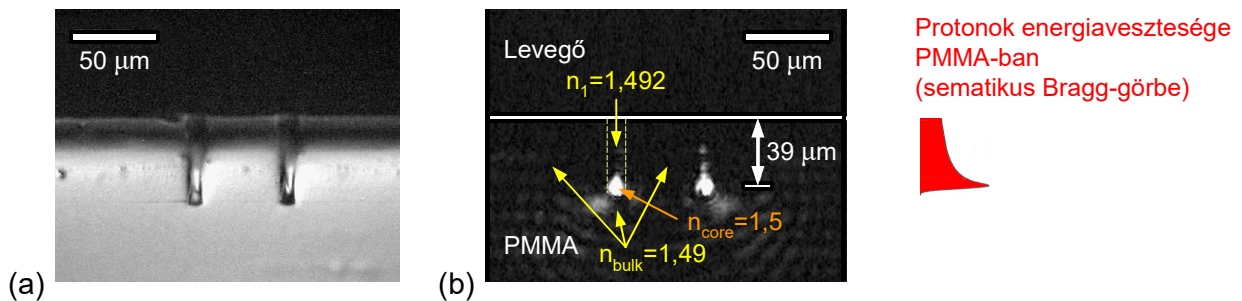
Igen, egyetérték. Az ebben a cikkben bemutatott eredmények még a hazai PBW első demonstrációi voltak. A későbbi publikációkban már lényegesen jobb minőségű mikrostruktúrákat sikerült készítenünk, azonban ekkor nem ismételtük meg a gyűrű rezonátort.

Ekkor hasonlítottuk össze a nyaláb vezérlésre rendelkezésre álló szoftverek lehetőségeit is. Az OMDAQ használatával egyszerű vonalak, vagy téglalapok rajzolhatók; az IonScan bonyolultabb alakzatok készítését is lehetővé teszi. Jelenleg a nanoszondához a korábbi tapasztalatok alapján saját fejlesztésű szoftver készítését tervezzük.

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 μm 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 felület tömörödése valóban csak akkor hatna a hullámvezető működésére, ha a nyaláb behatolási mélységével összemérhető lenne a tömörödés.

A cikkünk írásának idején még nem volt ismert a törésmutató mélységi eloszlása. A hullámvezető működéséből lehetett látni, hogy a nyers PMMA törésmutatójánál nagyobb kell legyen a besugárzott PMMA törésmutatója. Ezt azonban nem elegendő laterálisan belátni, azt is be kellett bizonyítani, hogy a protonok pályájának elején (a felület közelében) kisebb a törésmutató, mint a pálya végén (a Bragg-csúcsban). Ezt mutattuk meg később a „*Refractive index depth profile in PMMA due to proton irradiation*” [D2] cikkünkben. Az alábbi ábrán a törésmutató mélységi és laterális eloszlását mutatom a besugárzás környezetében.



Az ábra a dolgozat 53. ábrájának kiegészítése az 56. ábrából nyerhető információk alapján. A hullámvezető magjában – a Bragg-csúcsnál – a törésmutató-változás 0,01, így a nyers 1,49 érték 1,5-re módosul. A felülettől eddig a mélységig a protonok nyomvonalán a törésmutató-változás csupán 0,002 körüli, ezért a hullámvezető magját minden oldalról kisebb törésmutató veszi körül, így megvalósul a vezetés feltétele.

Innen látható az is, hogy ebben a mintában a vezetés ~9 μm széles és ~10 μm mély keresztmetszetben megy végbe.

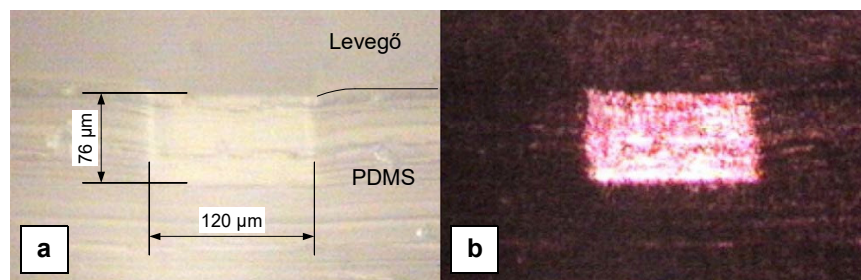
A 79. oldalon leírja, hogyan határozta meg a besugárzott PMMA törésmutató mélység-profiljét. Vagy a minta elé tettek egy 50 μm-es fóliát, vagy nem, illetve a besugárzási energiával hangolták tovább a behatolási mélységet. Így kapta a meglehetősen zajos 56. ábra adatait. Nem lett volna-e egyszerűbb és 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 D1 publikációban leírt mérést, beleértve a minta polírozását a Szingapúri Egyetemen végeztük. A polírozást a hullámvezetőre merőlegesen a minta szélein kellett végezni, így ennek hatása csak csekély mértékben befolyásolhatta a hullámvezetőt. Ha a felületet a hullámvezetővel párhuzamosan políroztuk volna (a D2 publikációban), az nagyon érzékeny lett volna egy esetleges párhuzamossági hibára. Attól is tartottunk, hogy a polírozás nagy felületen akár ha kis mértékben is módosítja a törésmutatót, akkor esetleg az effektust elmoshatta volna. A kimutatott törésmutató-változás a felület közelében 0,002, míg a Bragg-csúcsnál 0,01. Ezek az értékek a nyers törésmutatóhoz képest (1,49) kicsik, de ez már elegendő a hullámvezetés megvalósításához.

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 SRIM számolások szerint a 2 MeV energiájú protonok esetén a Bragg-csúcs $\sim 76 \mu\text{m}$ mélységben van. A besugárzott hullámvezető szélessége $120 \mu\text{m}$. Az 59. ábrán az látható, hogy a hullámvezetés nemcsak a Bragg-csúcsnak megfelelő mélységben, hanem a felület közelében is megtörténik. Ezért egy szabályos $120 \mu\text{m}$ széles, $76 \mu\text{m}$ mély téglalap látszik a minta keresztmetszetében.



Az eredeti ábrát itt kiegészítettem. Azért a világos látóterű képre rajzoltam, mert itt a levegő-PDMS határfelület jobban látszik. Az ábra *b*) része mutatja ugyanitt a fényvezetést. A határfelületen látható a besugárzás okozta tömörödés miatt a besugárzás mellett kialakuló görbült felület is.

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

Köszönöm a javaslatot, valószínűleg meg fogjuk csinálni. Abban az időben még nem rendelkeztünk COMSOL licenccel, azóta már megvásároltuk, és néhány más feladatra használtuk is.

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 gondolkodtak-e azon, hogy a PDMS minta nyújtásával változtassák a fókusz távolságot, és így érdekes tulajdonságú optikai eszközöket készítsenek?

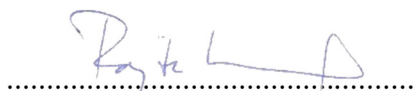
Ez egy remek ötlet! Nagyon köszönöm! A kész mintával ki lehet próbálni. A nyújtást célszerűen egy irányban lehet megtenni, ezzel asztigmatikus lencsére módosítani egy eredetileg szférikus lencsét. Vagy egy asztigmiasra sikerült lencsét szférikussá át lehet így alakítani.

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.

Valóban az áramlási tér bonyolultabb szerkezete adja a jelentősebb hatást, a felület növekedése kisebb jelentőségű.

A besugárzások tervezésekor 3D CFD (computational fluid dynamics) módszer alkalmazásával megvizsgáltuk a különböző döntési szögek mellett kialakuló áramlási képeket. A szimulációs eredmények kvalitatív értékelése alapján az alkalmazott 20° -os dőlés esetén az áramlási profil asszimetriája olyan lokális lineáris-sebesség csökkenést okoz, mely segíti a sejt-antitest kötés kialakulását. A döntés szögének megválasztásakor figyelembe vettük az alkalmazott besugárzási módszer technikai és gyakorlati korlátait is, vagyis hogy reprodukálható módon lehessen robusztus chipeket előállítani.

Debrecen, 2021. augusztus 30.



Rajta István