

# SZAKMAI ZÁRÓJELENTÉS

## Integrált optikai elemek készítése ionimplantálással és besugárással távközlési alkalmazásra

K 101223

### Bevezetés

A projekt célja az volt, hogy – a résztvevők által korábban elért eredményekre támaszkodva – olyan aktív és passzív sík és csatorna hullámvezetőket tervezzünk és készítsünk adalékolatlan és ritkaföldfémekkel adalékolt kristályokban és üvegekben ionnyalábok felhasználásával, amik alkalmasak lehetnek az optikai távközlésben történő felhasználásra.

A kitűzött célok teljesítésén túl, annak köszönhetően, hogy a projekt kezdete után hazai és nemzetközi együttműködések keretében sikerült fókuszált ionnyalábokat előállító gyorsítókon kísérleteket végezni, egyrészt a csatorna hullámvezetők készítésének új módszerét is kidolgoztuk, másrészt egy teljesen új módszert fejlesztettünk ki diffraktív és refraktív optikai elemek készítésére fókuszált ionnyalábokkal. Az utóbbi módszer szabadalmaztatása folyamatban van. Egy másik nemzetközi együttműködés keretében ritkaföldfémekkel adalékolt üveg mintákat nagy energiájú elektronnyalábbal sugároztuk be sík hullámvezetők készítése céljából. A többszintű optoelektronikai elemek modellezésére két módszerrel (több energiás implantálás az 500 keV – 3.5 MeV tartományban, valamint ismételt rétegnövesztés és alacsony energiájú (130 keV) implantálás kombinációja) Bragg rácsokat készítettünk.

A következőkben az elért eredményeket az eszközök típusa szerint csoportosítva mutatjuk be.

### 1. Sík hullámvezetők

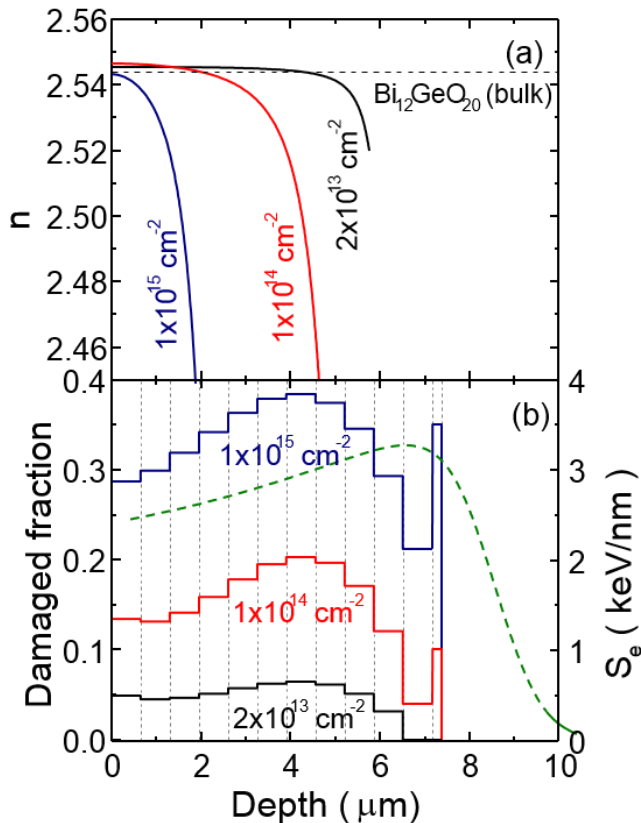
Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üveg mintákban a Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) program segítségével végzett modellezés alapján két energián történő N<sup>+</sup> besugárással készítettünk sík hullámvezetőket, hogy az egy energiás besugárzások esetében talált szivárgó (leaky) modulusokat kiküszöböljük. A használt energiakombinációk a következők voltak: 3.5 + 3.5 MeV, 3.5 + 3.0 MeV and 3.5 + 2.5 MeV, a fluensek pedig  $5.0 \cdot 10^{15}$  és  $2.0 \cdot 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> között voltak. A kísérleteket a Wigner FK 4 MV terminálfeszültségű Van de Graaff gyorsítóján végeztük. Az m-vonalas spektroszkópiai mérések szerint a két energián besugárzott hullámvezetők is működtek 1550 nm-en, és a szivárgó modulusok egy részét sikerült kiküszöbölni [1,2,4,5,6,7]. A hullámvezetők pontos minősítéséhez a terjedési veszteséget is mérni fogjuk, részben az IFAC-ban (COMPASSO, saját fejlesztésű m-vonalas spektrométer), részben a Wigner FK-ban a 2012-ben vásárolt Metricon 2010 Prism Coupler m-vonalas spektrométerrel. A terjedési veszteségek csökkentésére – korábbi kísérleteink alapján – hőkezelést fogunk alkalmazni (T < 260 C°).

Az Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üveg mintákhoz hasonlóan szillenit típusú bizmut germanát (BGO) kristály (Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>) mintákban is készítettünk egy – és kétenergiás N<sup>+</sup> ion besugárással sík hullámvezetőket. Az egy energiás besugárzások 3.5 MeV energián a  $2.0 \cdot 10^{15}$  és  $2.0 \cdot 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> fluens között

történtek. A tervezett kétenergiás besugárzások közül csak a 3.5 + 3.1 MeV kombinációval  $2.0 \cdot 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> fluensen sikerült hullámvezetőt készíteni a minták több besugárzás alatti törése miatt. A két energián besugárzott szillenit BGO hullámvezető is csak 1310 nm-ig működött, és benne is szivárgó módokat detektáltunk [3-7].

Az Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üveg és BGO kristály mintákon kívül CaF<sub>2</sub> kristályokban is sikerült ionimplantálással sík hullámvezetőket létrehozni [3,7].

Új nemzetközi együttműködés keretében a Centre de Micro-análisis de Materiales (Universidad Autónoma de Madrid, Spanyolország) tandem részecskegyorsítóján szillenit típusú BGO mintákban sikerült működő sík hullámvezetőket készíteni gyors nehéz ionokkal (25 MeV C<sup>5+</sup> 60° beesési szögben) alacsony fluenssel ( $10^{13} < F < 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>) történő besugárással. Ez a módszer azon alapul, hogy az elektronikus kölcsönhatás maximumának megfelelő mélységben a kristály már kis fluensű besugárzás hatására is amorfizálódik. Az amorf réteg barrier-ként szolgál, a hullámvezetés közte és a minta felszíne között lévő rétegben (well) jön létre. Az **1. ábrán** a szillenit BGO mintában különböző fluenseken besugárzott sík hullámvezetőknek a 633 nm-en TE konfigurációban felvett m-vonalas spektrumokból kiszámított törésmutató-profilja, valamint az amorfizáció a spektroszkópikus ellipszometriai mérésekből számított mélységi eloszlása látható. További tesztek (m-vonalas spektrumok TM konfigurációban és terjedési veszteségek mérése mindkét konfigurációban) után az eredmények publikálását tervezzük.

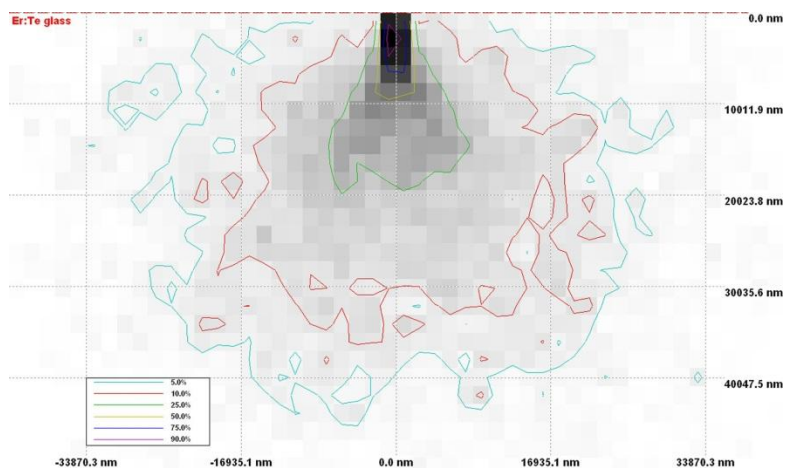


**1. ábra** (a) A besugárzott rétegek mélységi törésmutató-eloszlása a  $\lambda = 633$  nm-en TE konfigurációban mért m-vonalas spektrumokból számítva. (b) Az amorfizáció foka a mélység függvényében a spektroszkópikus ellipszometriai mérések alapján. Besugárzás 25 MeV C<sup>5+</sup> ionokkal 60° beesési szögben. Az elektronikus fékeződés mélységfüggését a szaggatott vonal mutatja.

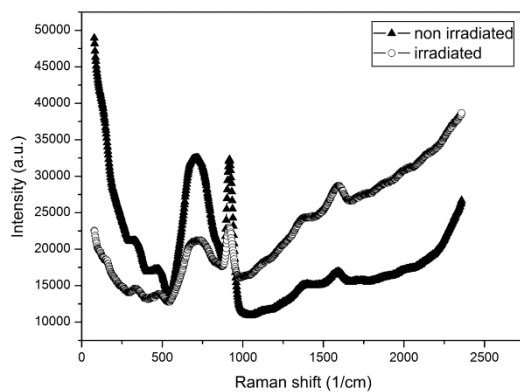
Ugyanezeket a kísérleteket elvégeztük 30 MeV-es  $F^{5+}$  ionokkal is,  $2 \cdot 10^{14}$ – $1.0 \cdot 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup> fluenseken. Az eredmények azt mutatták, hogy a fluor lényegesen nagyobb elektronikus fékeződése miatt már ezeken az alacsony fluenseken is az amortizált réteg egészen a minta felszínéig kiterjedt, így hullámvezetés nem volt megfigyelhető [8].

Projektünk során sikerült nyalábidőhöz jutnunk a Řež Nuclear Institute (Csehország) modern tandemron részecskegyorsítóján. A gyorsító implanter nyalábágán sík hullámvezetőket készítettünk Er: LiNbO<sub>3</sub> kristályban és Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üvegben 12.5 MeV energiájú Au<sup>5+</sup> ionokkal történő besugárással 2015-ben. E módszerrel várhatóan egy lépésben elérhető a sík hullámvezető kialakítása és a minta fotolumineszcencia hatásfokának növelése.

Nemzetközi együttműködés keretében az École Polytechnique de Palaiseau LSI Laboratóriumában (Palaiseau, Franciaország) 2013 tavaszán a SIRIUS nagy energiájú elektrongyorsítón kísérleteket végeztünk sík hullámvezetők létrehozására Er:TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> és Er:AS-24 (erbiummal adalékolt alumínoszilikát) üvegekben homogén besugárással 200 keV energiájú elektronnalábbal 0.1 és 2 C/cm<sup>2</sup> dózistartományban. A besugárzott rétegek vastagságára a CASINO programmal történt szimuláció a két üvegre rendre 10 és 50 μm-t adott (az energialeadás 50 %-án mérve), így már a közeli infravörösben is többmódusú működés volt várható (**2. ábra**).



**2. ábra** Az energialeadás térbeli eloszlása Er:TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üvegben 200 keV elektronokkal történő besugárással hatására.



**3. ábra** Raman eltolódás pristine és elektronokkal besugárzott Er:TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üvegben. E = 200 keV, dózis = 0.6 C/cm<sup>2</sup>. Horiba Lab HR, λ = 458 nm, 3 mW lézer teljesítmény. A 700 és 900 nm-es Raman csúcsok abszolút és relatív nagysága is lényegesen megváltozott a besugárással hatására.

A minták mikro Raman spektroszkópiai vizsgálata azt mutatta, hogy a nagy dózisu elektronbesugárzás jelentős szerkezeti változásokat okozott az üveg mintákban (**3. ábra**).

A besugárzott rétegeket nagy vastagságuk miatt csak infravörös spektroszkópikus ellipszometriával lehetett tanulmányozni (SE-2000 infravörös spektroszkópikus ellipszométer, SEMILAB, Budapest). Bár a nyers ellipszometriai spektrumok erős függést mutattak a besugárzott dózistól, nem sikerült egyértelműen meghatározni a besugárzott rétegek vastagságát.

## 2. Csatorna hullámvezetők

Kísérleteink során korábbi eredményeinkből indultunk ki, amelyek lehetővé tették 980 nm-ig működő csatorna hullámvezetők készítését Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üvegben egy speciális szilícium maszkon keresztül 1.5 MeV N<sup>+</sup> ionokkal történő implantálással [9].

A csatorna hullámvezetők készítésére három módszert dolgoztunk ki. Az első módszer a fenti továbbfejlesztése, a szilícium maszk mellett nagyobb, 3.5 MeV energiájú N<sup>+</sup> ionokat használtunk, hogy biztosítsuk az eszközök működést magasabb hullámhosszon (1550 nm) is.

A második módszer annyiban tért el az elsőtől, hogy a szilícium maszk helyett trapéz profilú fotoreziszt maszkot használtunk.

A harmadik módszer teljesen új, mivel 5 - 11 MeV energiájú közepnehéz ionok (szén, nitrogén, oxigén) mikronyalábjait használtuk csatorna hullámvezetők közvetlen beírására az optikai anyagokban. Ezeket a kísérleteket a már említett Řež Nuclear Institute tandemron részecskegyorsítójának mikronyaláb ágán végeztük több alkalommal.

Az első módszerrel Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üvegben és eulitin (Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>) és szillenit (Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>) BGO kristályban készítettünk 24 μm szélességű csatorna hullámvezetőket 3.5 MeV energiájú N<sup>+</sup> implantálással.

A második módszerrel mindkét típusú BGO kristályban készítettünk 24 μm szélességű csatorna hullámvezetőket 3.5 MeV energiájú N<sup>+</sup> implantálással.

Fókuszált nyalábbal történő közvetlen írással nagyszámú csatorna hullámvezető készült, 15 és 6 μm névleges szélességgel. Er:TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üveg mintákban 6 MeV C<sup>3+</sup> és 11 MeV C<sup>4+</sup> valamint 5 MeV N<sup>3+</sup> és 10.5 MeV N<sup>4+</sup> ionokkal készítettünk csatorna hullámvezetőket. A Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub> minták esetében ugyanezeket az ionokat használtuk. CaF<sub>2</sub> kristályokban 6 MeV-es O<sup>4+</sup> mikronyalábbal készítettünk csatorna hullámvezetőket. Végül ugyanezzel a módszerrel Er: LiNbO<sub>3</sub> és Yb: LYB kristályokba is írtunk csatorna hullámvezetőket, 5 MeV N<sup>3+</sup> és 10.5 MeV N<sup>4+</sup> ionokkal.

Az elkészült csatorna hullámvezetőket interferencia- és fáziskontraszt mikroszkópiával tanulmányozva többségüket szabályosnak találtuk, és magas laterális törésmutató-kontrasztot mérünk a csatorna és besugározatlan környezete között.

A fotoreziszt maszkkal készített csatorna hullámvezetők azonban általában nem voltak folytonosak, és szélességük is változó volt. Ez egyrészt a maszk implantáció közbeni sérüléseinek, másrészt a szigetelő mintán kialakuló töltésfelhalmozódásnak tulajdonítható. Az utóbbi kiküszöbölésére egy elektronforrás lett installálva a vákuumkamrában. A szigetelő minta sztatikus feltöltődése a

mikronyaláb periodikus eltérülését okozta a Řež-i tandemtronban, így ott már a legelső besugárzások után installáltunk egy elektronforrást.

Akárcsak az elektronbesugárzás esetében, az ionimplantáció által okozott szerkezeti változások is tükröződnek a minták mikro Raman spektrumaiban.

A csatorna hullámvezetők többsége a projekt utolsó két évében készült. Működőképességük tesztelését az Instituto di Fisica Applicata „Nello Carrara” MDF Laboratóriumában végezzük. Egyrészt a mérésekre szolgáló berendezés korlátozott hozzáférhetősége, másrészt a minták munka- és időigényes előkészítése miatt a projekt befejezéséig csak a minták egy kisebb részét tudtuk tesztelni, és az eddig megjelent publikációkban működőképességi tesztek nem szerepelnek [10, 11].

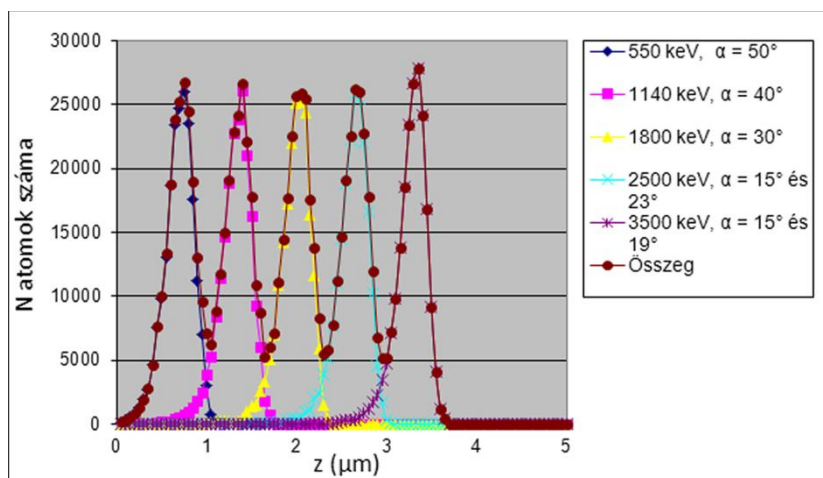
Ahogy azt a mikroszkopikus megfigyelések alapján vártuk, a fotoreziszt maszkon keresztül implantált csatorna hullámvezetők nem működtek.

Az eddigi tesztek eredményei szerint a szilícium maszkon keresztül a kétféle BGO kristályokba implantált csatorna hullámvezetők működnek a következő paraméterekkel: Az eulitin BGO kristályba írt csatorna hullámvezetők 1530 nm-en is működtek, valódi (nem szivárgó) modulusokban. A szillenit csatorna hullámvezetők 1310 nm-ig működtek, de több (szivárgó) módon. A többmódusú működés miatt nehéz a terjedési veszteségeket egyértelműen meghatározni.

Az Er: TeO<sub>2</sub>-WO<sub>2</sub> üveg mintában 11 MeV C<sup>4+</sup> fókuszált ionnyalábbal beírt csatorna hullámvezetők 1530 nm-en is működtek (egy modulusban). A 771 és 1390 nm-en mért terjedési veszteségek magasak, 18.5 ill. 15.9 dB/cm. Korábbi tapasztalataink alapján egy 260 C<sup>o</sup>-os hőkezeléssel a veszteségek várhatóan jelentősen, 1 – 2 dB/cm-re csökkenthetők.

### 3. Bragg rácsok

A többszintű Ionimplantált optikai elemek modelljeként 5 rétegű Bragg rácsot (reflexiós optikai rácsot) terveztünk és készítettünk nitrogén ionok implantálásával Pyrex üveg mintában. A tervezett rács uniformitását az ionnyaláb energiájának és beesési szögének, illetve a besugárzott fluens változtatásával érték el (**4. ábra**).



**4. ábra** Ionimplantált Bragg rács SRIM szimulációja

A **4. ábrán** a Bragg rács elkészítésének SRIM (Stopping and Range of Ion sin Matter) [12] szimulációja látható. Öt energián történő besugárzást tételeztünk fel. A beimplantált ionok eredő mélységi

eloszlása látható az ábrán. A Bragg rács pontos periodicitását az energiák (és beesési szögek) megfelelő megválasztása biztosítja. Mivel az ioneloszlás vastagsága az energiával nő, a Bragg rács rétegeinek azonos vastagságát a beesési szögek változtatásával lehet biztosítani, illetve a két legelső réteg dupla implantálásával (két-két beesési szöggel).

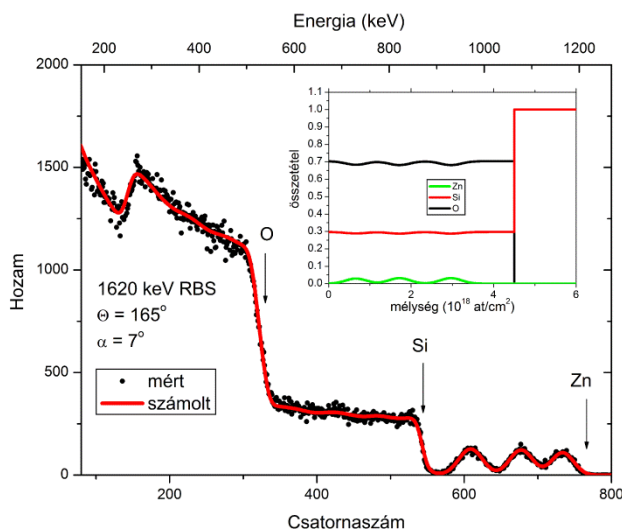
Az elkészült Bragg rács tesztelése nehézségekbe ütközött. A nagy teljes fluens (kb.  $10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup>) (és feltehetőleg a ferde beesés) miatt az implantált minta felszíne felhólyagosodott, optikailag erősen szóróvá vált. Ennek ellenére az UV-látható spektroszkópikus ellipszometriai mérések eredményei periodikus struktúra jelenlétére utalnak.

Bragg rácsokat más módon is készítettünk. Ez a módszer periodikus vékonyréteg-növesztésből (50 – 500 nm) és kis energiájú ionimplantációból (50 – 500 keV) áll. Korábbi projektekben már megkíséreltük kvázi-szinuszos mélységi törésmutató-eloszlás létrehozását CVD (Chemical Vapor Deposition) technikával növesztett SiO<sub>2</sub> vékonyrétegekben nitrogén és argon ionok implantálásával.

Az új kísérletekben először SiO<sub>2</sub> egyes rétegeket (d = 110 nm) növesztettünk Si szubsztrátokon, a rétegekbe különböző kis energiájú ionokat (argon, nitrogén, cink) implantáltunk nagy fluensekkel ( $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>), és a mintákat Rutherford visszaszórással (RBS) és spektroszkópikus ellipszometriával (SE) vizsgáltuk. E kísérletek legfontosabb eredménye az volt, hogy a 130 keV energiájú Zn ionokkal történő implantálás a SiO<sub>2</sub> vékonyrétegben a Zn ionok kvázi Gauss mélységi eloszlását eredményezte, és ez az eloszlás stabil termikusan maradt 500 °C-ig. A SE mérések szerint a Zn implantálással létrehozott törésmutató-moduláció 0.1 nagyságrendű volt [13].

A fenti eredmények alapján 5 rétegű Bragg rácsokat terveztünk és készítettünk SiO<sub>2</sub> rétegek periodikus egymásra növesztésével és Zn ion implantálásával. Két teljesen egyforma minta készült, az egyik üveg (transzmissziós mérésekhez), a másik szilícium szubsztráton. Az első SiO<sub>2</sub> réteg vastagsága 300 nm volt (hogy biztosan ne implantáljunk cinket a szubsztrátba), a többi négy pedig 200 nm. Az implantált Zn ionok energiája mind az öt rétegben 130 keV volt (merőleges beesés mellett), a fluens pedig  $2 \cdot 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>.

A Bragg rácsokat az egyes implantálási lépések között RBS-szel és SE-vel is vizsgáltuk. Az RBS mérések szerint a beimplantált Zn ionok mélységi profilja valóban periodikus és szabályos (**5. ábra**).



**5. ábra** Bragg rács RBS spektruma és az abból számított mélységi elemeloszlás három réteg elkészülte után.

A spektroszkópikus ellipszometriai eredmények kiértékelése jelenleg is folyik. A Bragg rácsok működésének mérésére (goniométer, spektroszkóp) a közeljövőben kerül.

#### 4. Diffraktív és refraktív optikai elemek.

Első kísérleteink során hazai együttműködés keretében az MTA ATOMKI Van de Graaff részecskegyorsítójának mikronyaláb ágán 2 MeV-es protonokkal illetve 1 MeV-es He, ionokkal  $10^{14}$  -  $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> fluens tartományban 4 – 32  $\mu$ m rácsállandójú kvázi szinuszos profilú transzmissziós optikai rácsokat készítettünk Pyrex üveg és IOG (Schott foszfát üveg) mintákban. A rácsok transzmissziós interferencia- és fáziskontraszt mikroszkopikus képei azt mutatták, hogy az optikai úthossz modulációja valóban szinuszos a rácsokban. A minták atomerő mikroszkopikus mérései (AFM) azt mutatták, hogy az implantálás nem okozott mérhető felszíni változást, tehát az ionimplantált struktúrák tiszta törésmutató-rácsok voltak. A viszonylag nagy fluensek ellenére a rácsok első rendű diffrakciós hatásfoka 1 % körül maradt. A magasabb rendekben, a kvázi-sinuszos profilnak megfelelően a hatásfokok 0.01 % alatt voltak, ill. alig mérhetőek.

A transzmissziós optikai rácsok készítésében hatalmas előrelépést hoztak azok a kísérletek, amelyeket a már említett cseh-magyar együttműködés keretében a Řež Nuclear Institute tandemron részecskegyorsítójának mikronyaláb ágán végeztük több alkalommal. Szén, oxigén és nitrogén ionok 5 – 11 MeV energiájú mikronyalábjaival Pyrex és IOG üvegekben, Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>, CaF<sub>2</sub>, Er-LiNbO<sub>3</sub> és Yb:LYB kristályokban készítettünk szinuszos profilú transzmissziós optikai rácsokat. A rácsok rácsállandója 4 és 50  $\mu$ m között volt. Optikai és AFM mérések azt mutatták, hogy ezek a rácsok kevert típusúak voltak, vagyis az implantálás hatására a minták belsejében periodikus törésmutató-változás, felszínükön pedig periodikus profil jött létre. A rácsok diffrakciós hatásfokát 633 nm-es He-Ne lézerrel mértük. A rácsok nagy részének az első rendekben mért diffrakciós hatásfoka 10 és 40 % között volt, merőleges megvilágítás mellett. A legmagasabb értéket (40 %) a Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub> kristályban 10.5 MeV energiájú N<sup>4+</sup> mikronyalábbal készített rácson mértük. A diffrakciós hatásfok meghatározásánál a Fresnel reflexiókat és az implantálatlan minta transzmisszióját (a BGO kristály esetében 633 nm-en az csak 0.66) is figyelembe vettük.

A fenti módszerrel a szinuszos rácsokhoz hasonlóan ún. blézelt v. fűrészfog profilú transzmissziós optikai rácsokat is készítettünk ugyanazokban a mintákban. Az ilyen rácsok pl. spektrométerekben használhatók.

A diffraktív optikai elemeken kívül az ion mikronyalábokkal egy refraktív optikai elemet, ún. spirális fázislemezeket és készítettünk több kristályos optikai anyagban. Az ilyen optikai elemek az optikai távközlésben és részecskék optikai manipulációjában használhatóak.

Úgy döntöttünk, hogy a diffraktív és refraktív optikai elemek készítésében elért eredményeink alapján szabadalmi igényt nyújtunk be az eljárásra és az optikai elemekre.

#### Hivatkozások

1. Bányász I, Zolnai Z, Pelli S, Berneschi S, Nunzi Conti G, Fried M, Lohner T, Petrik P, Brenci M, Righini GC: Fabrication of barrier-type slab waveguides in Er<sup>3+</sup> - doped tellurite glass by single- and double energy MeV N<sup>+</sup> ion implantation, Proc. of SPIE, Vol. 8264, 826406, 2012
2. I. Bányász, S. Berneschi, M. Bettinelli, M. Brenci, M. Fried, N.Q. Khanh, T. Lohner, G. Nunzi Conti, S. Pelli, P. Petrik, G.C. Righini, A. Speghini, A. Watterich, Z. Zolnai, MeV energy N<sup>+</sup> - implanted planar optical waveguides in Er-doped tungsten-tellurite glass operating at 1.55

- $\mu\text{m}$ , IEEE Photonics Journal, Volume 4, Issue 3, pp. 721-7 , DOI: 10.1109/JPHOT.2012.2194997 (2012)
3. I. Bányász, S. Berneschi, N. Q. Khanh, T. Lohner, K. Lengyel, M. Fried, Á. Péter, P. Petrik, Z. Zolnai, A. Watterich, G. Nunzi-Conti, S. Pelli and G. C. Righini, Formation of slab waveguides in eulytine type BGO and  $\text{CaF}_2$  crystals by implantation of MeV nitrogen ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 286, 80–84 , (2012)
  4. I. Bányász ; Z. Zolnai ; S. Pelli ; S. Berneschi ; M. Fried ; T. Lohner ; G. Nunzi-Conti ; G. C. Righini, Single- and double-energy  $\text{N}^+$  - irradiated planar waveguides in eulytine and sillenite type BGO crystals, Proc. SPIE 8627, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVII, 862705 (2013); doi:10.1117/12.2004563
  5. I. Bányász, S. Berneschi, M. Fried, T. Lohner, G. Nunzi Conti, G.C. Righini, S. Pelli, Z. Zolnai, M-line spectroscopic, spectroscopic ellipsometric and microscopic measurements of optical waveguides fabricated by MeV-energy  $\text{N}^+$  ion irradiation for telecom applications, Thin Solid Films, 541, 3-8 (2013), doi: 10.1016/j.tsf.2012.11.134
  6. I. Bányász , Z. Zolnai, M. Fried, T. Lohner, S. Berneschi, G. Righini, S. Pelli , G. Nunzi Conti, Single - and double energy  $\text{N}^+$  ion irradiated planar optical waveguides in Er: Tungsten-Tellurite Oxide glass and sillenite type Bismuth Germanate crystals for telecom applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 307, 299-304 (2013)
  7. I. Bányász , Z. Zolnai, M. Fried, S. Berneschi, S. Pelli , G. Nunzi Conti, Leaky mode suppression in planar optical waveguides written in Er: $\text{TeO}_2$ - $\text{WO}_3$  glass and  $\text{CaF}_2$  crystal via double energy implantation with MeV  $\text{N}^+$  ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 326, 81-85 (2014)
  8. O. Peña-Rodríguez, J. Olivares, I. Bányász, Optical properties of crystalline and ion-beam amorphized  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ : Relevance for waveguide applications, Optical Materials, Volume 47, September 2015, Pages 328–332 (2015), doi:10.1016/j.optmat.2015.05.050
  9. S. Berneschi, G. Nunzi Conti, I. Bányász, A. Watterich, N. Q. Khanh, M. Fried, F. Pásztí, M. Brenci, S. Pelli, G. C. Righini "Ion beam irradiated channel waveguides in  $\text{Er}^{3+}$ -doped tellurite glass", Applied Physics Letters, 90, 121136, (2007)
  10. I. Bányász, I. Rajta, G.U.L. Nagy, Z. Zolnai, V. Havranek, S. Pelli, M. Veres, L. Himics , S. Berneschi, G. Nunzi-Conti and G. C. Righini, Ion beam irradiated optical channel waveguides, Proc. SPIE 8988, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVIII, vol. 8988, 898814-2-9 (2014)
  11. I. Bányász, I. Rajta, G.U.L. Nagy, Z. Zolnai, V. Havranek, S. Pelli, M. Veres, S. Berneschi , G. Nunzi-Conti and G. C. Righini, Fabrication of optical channel waveguides in crystals and glasses using macro- and micro ion beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 331, 157-162 (2014)
  12. J.F. Ziegler, SRIM-2003, Nucl. Instr. and Meth. B, **219–220** 1027 – 36 (2004 ) and <http://www.srim.org>
  13. E. Szilágyi, I. Bányász, E. Kótai, A. Németh, C. Major, M. Fried and G. Battistig, Determination of migration of ion-implanted Ar and Zn in silica by backscattering spectrometry, Radiation Effects and Defects in Solids, 170, pp. 229-237 , (2015), DOI: 10.1080/10420150.2015.1039534