

# EXTRÉM NAGY TÉRERŐSSÉGŰ TERAHERTZES IMPULZUSOK ELŐÁLLÍTÁSA LÍTIUM-NIOBÁTBAN

Pálfalvi László,<sup>1</sup> Fülöp József András,<sup>2,3</sup> Tóth György,<sup>1</sup>  
Almási Gábor,<sup>1,3</sup> Hebling János<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Pécsi Tudományegyetem, TTK Fizikai Intézet

<sup>2</sup>MTA–PTE Nagy Intenzitás Terahertzes Kutatócsoport

<sup>3</sup>Pécsi Tudományegyetem, Szentágotthai János Kutatóközpont

Az elektromágneses spektrum távoli infravörös, vagy más néven terahertzes (THz-es) tartománya az infravörös és a mikrohullámok közt helyezkedik el. A THz-es sugárzás előállításával kapcsolatos kutatások és fejlesztések az utóbbi két évtizedben kiemelten fontossá váltak olyan alkalmazási lehetőségeknek köszönhetően, mint például a képalkotás. A tudományos kutatásban a kis intenzitású THz-es sugárzás fő felhasználási területe a lineáris spektroszkópia [1]. Nagy intenzitású THz-es nyalábok pedig olyan ultragyors folyamatok vizsgálatát lehetővé tevő pumpa-próba méréseknek lehetnek eszközei, melyben a pumpaimpulzus a THz-es tartomány-

ba esik. A legnagyobb (1 MV/cm-t meghaladó) csúcs elektromos térerősségű THz-es impulzusok számára ígéretes alkalmazások a részecskegyorsítás [2–4], illetve a stabil vívő-burkoló fázisú egyciklusú attoszekundumos impulzusok Thomson-szórással történő keltése [5].

A THz-es fizika időszámításának kezdetét a THz-es impulzusok jelalakjának első méréséhez köthetjük. A pikoszekundumos nagyságrendű tartományba eső impulzushosszú hullámforma detektálását az elektrooptikai mintavételezés teszi lehetővé. A számos fontos ipari, gyógyászati és kutatási alkalmazás lehetősége miatt a nagy energiájú THz-es forrásfejlesztés stratégiai fontosságú feladat.

Nagy energiájú, egyciklusú THz-es impulzusok keltésére hatékony módszer az ultrarövid impulzusok nemlineáris kristálybeli optikai egyenirányítása. Nemlineáris optikai folyamatról lévén szó kézenfekvőnek tűnik, hogy a kitűnő nemlineáris optikai tulajdonságokkal rendelkező lítium-niobátot (LiNbO<sub>3</sub>, a továbbiakban LN) használjuk e célra. Ahhoz, hogy hatékony THz-keltés valósulhasson meg, elvárt kritérium, hogy a keltő optikai impulzus és a keltett THz-es jel együtt haladjon a közegben, azaz biztosított legyen a sebességillesztés. LN esetén azonban a törésmutató jelentősen eltér az optikai és a THz-es tartományon, ami a sebességillesztést ellehetetleníti.

A munkát az EFOP-3.6.2-16-2017-00005 azonosító számú, *Ultragyors fizikai folyamatok atomokban, molekulákban, nanoszerkezetekben és biológiai rendszerekben* című projekt és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (T. Gy.) támogatta.



*Pálfalvi László* egyetemi tanulmányait a PTE fizika szakán végezte. Jelenleg a PTE Fizikai Intézet Kísérleti Fizika Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára, az MTA doktora. Kutatási területe a távoli infravörös (terahertzes) impulzusforrások fejlesztéséhez kapcsolódó elméleti számítások végzése, illetve kristályminősítő eljárások módszertani fejlesztése. Számos hazai és nemzetközi szabadalomban társfeltaláló.



*Fülöp József András* 2003-ban szerzett PhD fokozatot lézerfizikából a Szegedi Tudományegyetemen. Az MTA–PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatócsoport tudományos tanácsadója, az MTA doktora. Részt vett az ELI-ALPS felépítésében, ahol jelenleg csoportvezetői feladatot lát el. Kutatási területe nagy intenzitású optikai és terahertzes impulzusok előállítása és alkalmazásai.



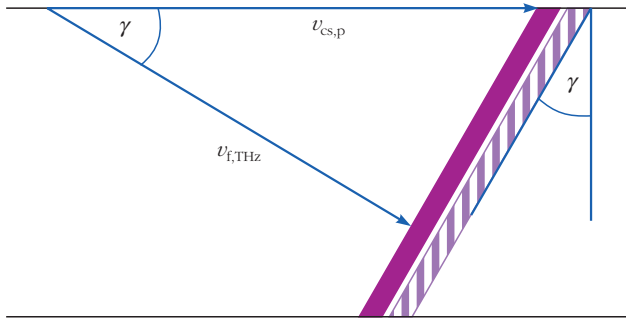
*Tóth György* egyetemi adjunktus fizika-matematika szakos diplomát 2011-ben, doktori fokozatot 2016-ban szerzett a Pécsi Tudományegyetemen. 2014–2017 között az MTA–PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatócsoport, 2018-tól a Pécsi Tudományegyetem munkatársa. 2019-ben elnyerte az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíját. Fő kutatási területei ultrarövid fényimpulzusok előállításához, azok nemlineáris terjedésének modellezéséhez, valamint terahertzes impulzusok hatékony előállításához köthetők.



*Almási Gábor* egyetemi docens, a PTE Fizikai Intézet igazgatója fizikus diplomáját 1984-ben a József Attila, doktori fokozatát 2000-ben a Szegedi Tudományegyetemen szerezte. Kutatási tevékenysége a nagy impulzusenergiájú, közel egyciklusú terahertzes impulzusok keltése, illetve azok alkalmazásainak számítógépes modellezése felé irányul. Az ELI számára készülő terahertzes műszeregyüttes kifejlesztését végző csoport egyik irányítója. Több oktatás- és tudomány-szervezési tevékenységben vesz részt.



*Hebling János* egyetemi tanár, Széchenyi-díjas lézerfizikus, a PTE Fizikai Intézetének igazgatója 2008–2017-ig. Kutatási területe ultrarövid lézerimpulzusok előállítása és alkalmazása, különös tekintettel a nagyenergiájú terahertzes impulzusok előállítására és ultragyors folyamatok vizsgálatára, valamint részecskék gyorsítására történő felhasználására. Optical Society of America Fellow, a *JOSA B* folyóirat szerkesztője, az EPS QEOD Board tagja.



1. ábra. A döntött impulzusfrontú sebességillesztés elvét szemléltető ábra. Az optikai impulzus intenzitásfrontját a vastag vonal jelzi. A keltett THz-es impulzus egy fázisfrontját a sávozott alakzat mutatja.

Az általunk kifejlesztett, 2002-ben demonstrált, döntött impulzusfrontú gerjesztési módszer lehetőséget biztosít a sebességillesztési nehézségek leküzdésére [6]. A módszer lényege a pumpáló lézerpulzus intenzitásfrontjának (impulzusfrontjának) megdöntése a fázisfronthoz képest (1. ábra). Döntött impulzusfrontú pumpálónyalábbal történő gerjesztés során a sebességillesztés feltétele úgy teljesül, hogy az optikai impulzus  $v_{cs,p}$  csoportsebességének a THz terjedési irányra vett vetülete egyenlő lesz a THz-es impulzus  $v_{f,THz}$  fázissebességével, ahogy azt az 1. ábra szemlélteti, azaz

$$v_{cs,p} \cos \gamma = v_{f,THz}, \quad (1)$$

ahol  $\gamma$  az impulzusfront dőlésszöge, amelynek értéke LN esetén körülbelül  $63^\circ$ . A keltett THz-es sugárzás az impulzusfrontra merőlegesen terjed. Ezért, a reflexiós veszteségek minimalizálása, illetve a kilépő THz-es nyaláb szögdiszperziójának elkerülése érdekében a kristály kilépő síkját annak belépő síkjával  $\gamma$  szöget bezáróan kell kialakítani.

Egyszerűen levezethető általános érvényű tény, hogy az impulzusfrontdőlés szögdiszperzióval jár együtt, ahogy azt a

$$\text{tg} \gamma = - \frac{n_{f,p}}{n_{cs,p}} \lambda_0 \frac{d\epsilon}{d\lambda} \quad (2)$$

összefüggés kifejezi [7], amelyben  $n_{f,p}$  és  $n_{cs,p}$  a pumpálásra vonatkozó fázis- és csoport-törésmutató,  $\lambda_0$  a vákuumbeli központi hullámhossz,  $d\epsilon/d\lambda$  pedig a szögdiszperzió.

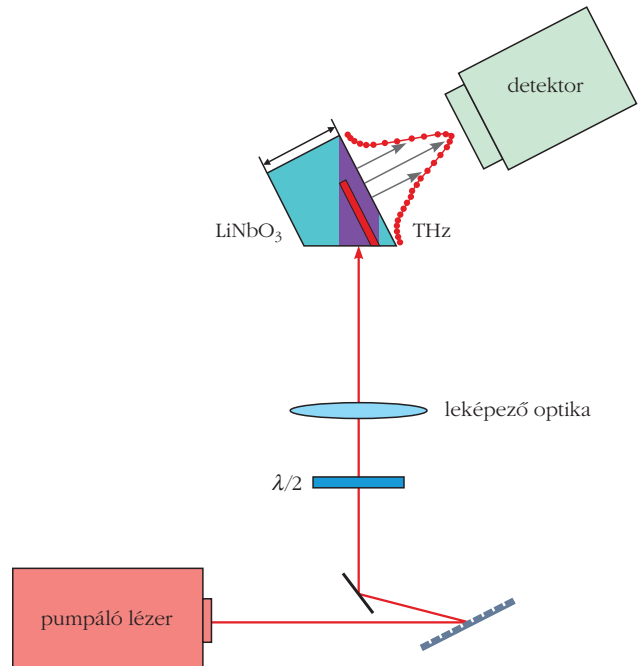
Szögdiszperzió létrehozására spektrális bontóelemek használhatók. Viszonylag nagymértékű impulzusfrontdöntés esetén erre az optikai rács a legalkalmasabb. Az első demonstrációs kísérletünk után világszerte egyre több kutatócsoport kezdte el használni a 2. ábrán látható, mára hagyományosnak mondható döntött impulzusfrontú gerjesztési sémát. Az elrendezésben a pumpáló nyaláb egy reflexiós rácson diffrakciót szenved, amely során szögdiszperzió jön létre. Ezután a nyalábot leképező optikán (lencsén vagy teleszkópon) keresztül a kristályba – annak belépő síkjára merőlegesen – vezetjük. A diffrakció geometriáját, illetve a leképezést úgy kell beállítani, hogy egyrészt a kristálybeli impulzusfront dőlésszöge eleget tegyen az

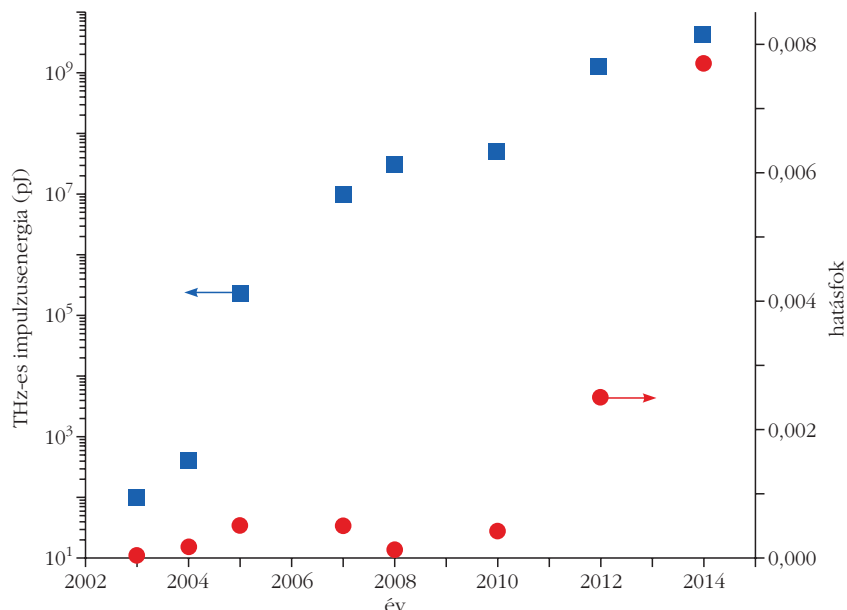
(1) egyenletnek, másrészt a rács képe az impulzusfronttal párhuzamosan keletkezzen a kristályban. Az első feltétel teljesülése biztosítja a sebességillesztést. A második pedig a keltési folyamat kellő hatékonyságát és homogenitását biztosítja, ugyanis az impulzusfront mentén mindenütt ekkor rekonstruálódik az eredeti Fourier-transzformáció limitált impulzushossz.

A döntött impulzusfrontú gerjesztési módszer teljesítőképességét jelzi, hogy folyamatos, tudatos optimalizálásnak köszönhetően egy évtized alatt a THz-es impulzusenergia hét nagyságrendet meghaladó növekedését sikerült elérnünk LN-ot használva, ahogy azt a 3. ábra mutatja a konverziós hatásokkal együtt. A grafikon utolsó pontpárja  $430 \mu\text{J}$  THz-es impulzusenergiát, illetve  $0,77\%$  konverziós hatásfokot jelöl [8]. Mindezt  $1030 \text{ nm}$  központi hullámhosszú, nem transzformációlimitált  $780 \text{ fs}$  impulzushosszú pumpálással, szobahőmérsékleten érték el. Abban az időben ez az impulzusenergia világrekordként volt számon tartva, LN-tal ezt az értéket azóta sem sikerült túlszárnyalni. A LN-tal előállítható közel egyciklusú impulzusok elektromos térerősségének csúcserőssége a  $\text{MV/cm}$ -es tartományba esik, ami elegendő ahhoz, hogy töltött részecskék gyorsításával kapcsolatos alkalmazások felvetődjenek. Kihívás olyan módszerek kifejlesztése, amelyekkel a térerősség tovább növelhető.

A 3. ábrán látható látványos energiabeli növekedés egyik oka az adalékoltalan LN kristályról a THz-es abszorpció szempontjából kedvezőbb  $0,7 \text{ mol}\%$  magnéziummal adalékolt sztöchiometrikus LN-ra való áttérés volt. E kristályokat a Wigner Fizikai Kutatóintézetben növesztik. A másik nagyon fontos tényező a pumpálás jellemzőinek – különös tekintettel a pum-

2. ábra. A hagyományos, döntött impulzusfrontú gerjesztési elrendezés fő komponensei a pumpáló lézer, az optikai rács, a leképező optika és a nemlineáris kristály.

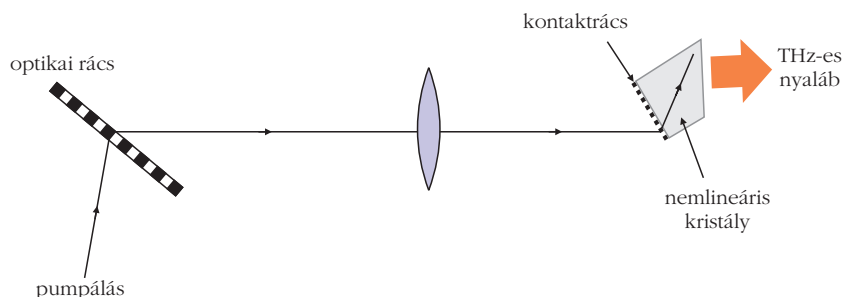




3. ábra. A THz-es impulzusenergia (bal oldali logaritmusos skála) és THz-keltés hatásfokának (jobb oldali skála) evolúciója.

páló impulzushosszra – alkalmas megválasztása volt. A THz-keltés (lokális) hatásfoka fordítottan arányos a (lokális) pumpáló impulzushosszal. E tényből viszont korántsem szabad arra a következtetésre jutni, hogy annál effektívebb a keltés minél rövidebb transzformációlimitált pumpáló lézerpulzust használunk. A szögdiszperzió jelenléte ugyanis a pumpáló impulzushossz terjedéssel történő kiszélesedését okozza. Rövid transzformációlimitált impulzushossz esetén ez a változás a terjedéssel gyorsan bekövetkezik, vagyis rövid lesz az a térbeli tartomány, ahol az átlagos impulzushossz kicsi, azaz ahol intenzív a THz-keltés. Hosszú transzformációlimitált impulzushossz esetén a szögdiszperzió okozta változás lassabb, viszont a túl hosszú impulzushossz eleve kedvezőtlen. Modellszámításokkal optimalizáltuk a pumpáló impulzushosszértéket. Eredményeink az mutatták, hogy a korábban használt tipikusan 100 fs-os Ti:zafír impulzusok helyett célszerű jóval hosszabb impulzusokat használni a THz-keltésre. A 430  $\mu$ J energiájú THz-es impulzusok demonstrálásához tartozó kísérletek már az optimális közeli impulzushosszú pumpáló impulzusokkal, illetve THz-es abszorpció szempontjából optimalizált kristályösszetétellel történtek. A

4. ábra. A hagyományos, döntött impulzusfrontú gerjesztésű THz-es sugárforrás és a kontaktrács ötvözet: a hibrid sugárforrás.



hatásfok további jelentős növeléséhez vezet a kristály kriogenikus hűtése a THz-es abszorpció csökkenésének köszönhetően.

A terahertzes energia felskálázásához kézenfekvőnek tűnik a pumpáló energia növelése. Ez egyben a pumpanyaláb szélesítését is jelenti (jellemzően a pár mm-es tartományról akár néhány cm-esre), ugyanis ügyelni kell arra, hogy a pumpáló intenzitás ne érje el a LN kristály roncsolási küszöbértékét. A széles pumpanyalábok használatának azonban a hagyományos döntött impulzusfrontú THz-es gerjesztési séma két esszenciális jellemzője korlátot szab. Egyik a leképezési hibák jelenléte, ez a nagy szögdiszperzióval rendelkező pumpanyaláb impulzusainak a transzverzális koordinátáival növekvő impulzushosszabbodásában mutatkozik meg, ami a konverziós hatásfok telítődéséhez vezet. A másik korlátozó tényező a nemlineáris kristály prizmaalakja. Azon kristályoknál, amelyeknél az ékszög jellemzően nagy (ilyen a LN) a hatásfokromlás mellett a nyaláb minőségének romlásával is szembe kell nézni. Széles pumpanyaláb esetén ugyanis a pumpanyaláb keresztmetszetben átellenes két oldalán keltett THz-es nyaláb jelentősen eltérő hosszon keltődik, így a LN kristályban eltérő mértékű abszorpciónak és diszperzióknak van kitéve és a nemlineáris hatások is különbözőek. Emiatt a pumpanyaláb két oldalán szimmetrikusan elhelyezkedő részekén keltett THz-es impulzusok intenzitása, valamint az impulzusokban az elektromos tér időbeli lefutása jelentősen különbözik egymástól, azaz gyengébb koherenciájú, erősen aszimmetrikus THz-es nyaláb keletkezik. Emiatt a THz-es nyalábot nem lehet erősen (a diffrakció által meghatározott korlátnak megfelelően) fókuszálni. Ez ellehetetlenít olyan fontos alkalmazásokat, mint a THz-es térrel történő részecskegyorsítás.

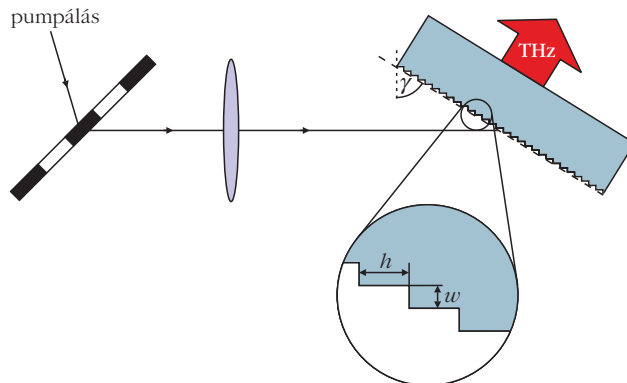
Olyan elrendezéseket kerestünk, amelyekkel leképezés nélkül (vagy redukált leképezési hibákkal), illetőleg plánparalel (vagy kis ékszögű) LN kristállyal lehet megvalósítani a THz-keltést.

Javasoltunk egy úgynevezett kontaktrács-sugárforrást, amely a leképező optika kiiktatásával kompakt módon egyesíti a szögdiszperziót (és azon keresztül az impulzusfrontdőlést) létrehozó rácsot és a nemlineáris kristályt. A diffrakciós rács a kristály bemeneti felületén van kialakítva, praktikusán a kristály anyagából. Egy előnyös kiviteli alak a bináris négyszögrács. Azonban a rács finomszerkezetére is kiterjedő elméleti szimulációk sorozatainak és

a gyártási próbálkozásoknak konklúziói LN esetén nem voltak biztatóak. A jó diffrakciós hatásfokú becsatoláshoz egyrésztől ugyanis olyan nagy, körülbelül 3000 1/mm-es modulációsűrűség szükséges, ami az ionmaratásos technológia precizitásának határait átlépi. Kísérleti próbálkozások eredményeként a derékszögű bináris profil helyett csak trapézprofil sikerült létrehozni. Ez pedig drasztikus diffrakciós hatásfokcsökkenéshez vezet. Másrésztől továbbra is prizma alakú LN kristályra van szükség, bár a hagyományos esethez tartozónál kisebb (körülbelül  $45^\circ$ -ra csökkent) ékszöggel. Szükséges továbbá a belépő oldalon törésmutató-illesztő közegek alkalmazása is.

E problémákat jelentősen redukálja egy, a 4. ábrán látható hibrid séma, amely a hagyományos elrendezés és a kontaktrács ötvözet. A sebességillesztéshez szükséges szögdiszperzió két lépésben jön létre: egyrészt az optikai rácson, másrészt a LN kristály bemenetén lévő kontaktrácson. Ebből következően a leképezési hibák okozta impulzustorzulások a hagyományos elrendezéshez képest redukálódnak, mivel a leképező optikát érő nyaláb szögdiszperziója csökken. Másrésztől az optikai rácscsal történő impulzusfront „elődöntésnek” köszönhetően kisebb feladat hárul a kontaktrácsra, a szükséges karcolatsűrűséget ezáltal olyan értékre redukálva, ami jelentősen csökkenti a gyártástechnológiai nehézségeket. Harmadrésztől a szükséges ékszög értéke is mintegy  $30^\circ$ -ra csökkent. Ezen hibrid séma kísérleti megvalósítása előkészítés alatt van.

A hagyományos gerjesztési sémával szembeni egyik fő kritika, hogy a nagy szögdiszperzió a széles spektrummal rendelkező pumpaimpulzus gyors időbeli szétfolyását eredményezi a kristályban. Ennek kiküszöbölésére *Ofori-Okai* munkatársaival [9] a döntött impulzusfrontú terahertzességkeltés egy olyan, a szögdiszperzió hátrányos hatásaitól mentes változatát javasolja, amely a pumpanyaláb impulzusfront döntését a mikrométeres nagyságrendbe eső periódusú diffrakciós rács helyett egy nagyságrendileg nagyobb, körülbelül száz mikrométeres periódusú lépcsős struktúrán való reflexióval valósítja meg (reflexiók echelle rácst alkalmazó keltési elrendezés). Elemi megfontolások szerint a reflexió során az impulzusfront finomszerkezete szintén lépcsős lesz, amelynek mélysége a lépcsős rács lépcsőmélységének kétszerese, magassága a lépcsős rács lépcsőmagasságával azonos lesz. Az impulzusfront átlagos dőlésének mértékét a lépcsős struktúra lépcsőinek magassága és mélysége határozza meg. A keltési módszer hátránya a lépcsős szerkezetű impulzusfront periodikus fázistoló hatása, ami túl durva lépcsős struktúra esetén a keltett THz térre nézve destruktív interferenciát eredmé-

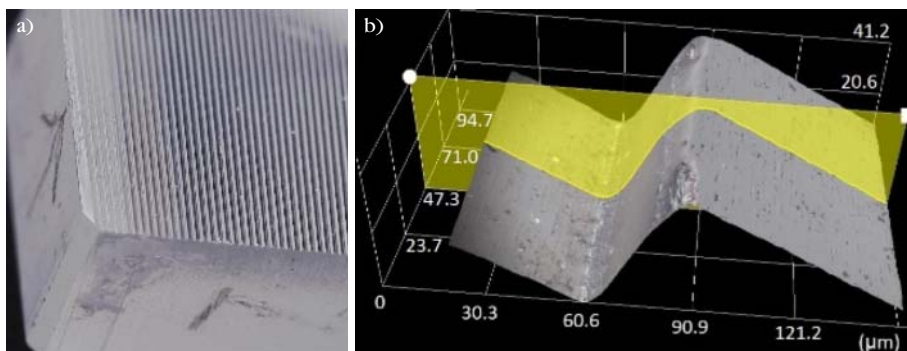


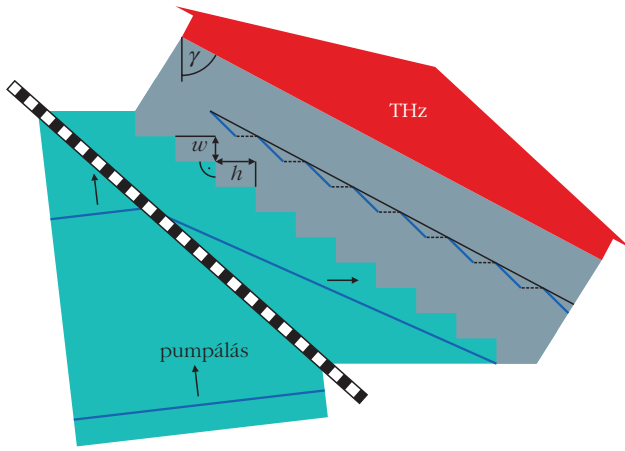
5. ábra. Az optikai rácst, leképező optikát és plánparalel lépcsős rácsot tartalmazó THz-es sugárforrás.

nyez. A sebességillesztés által megkövetelt mértékű impulzusfrontdőlés a pumpanyaláb terjedési útjában elhelyezett leképező optikával kerül beállításra. A keltett THz-es sugárzás a kristálybeli lépcsős impulzusfront burkolójára merőlegesen terjed. Ennélfogva a THz-es sugárzás kristályból történő kicsatolásához pontosan olyan (LN alkalmazásakor  $\gamma = 63^\circ$ -os) ékszöggel kialakított prizma szükséges, mint a konvencionális esetben, ami – mint fent kifejtettük – komoly korlátozó tényező a THz-es energia felskálázásában.

Sikerült olyan megoldást találnunk, amely lépcsős rácsot alkalmaz, de lehetővé teszi plánparalel kristály használatát. A 4. ábrán bemutatotthoz hasonlóan, első lépésben optikai rácst és leképezést használunk, a hibrid kontaktrács helyett viszont lépcsős rács bemenettel rendelkező plánparalel nemlineáris kristályt. Megmutattuk, hogy a sebességillesztett, maximalizált hatásfokú THz-es impulzusokeltés egy jól definiált gerjesztési geometriával valósítható meg. Nevezetesen, a kristály belépő felülete burkolójának normálisa a beeső nyalábbal  $\gamma$  szöget kell, hogy bezárjon (lásd 5. ábra). A képsíknak, illetve az elődöntéssel rendelkező impulzusfrontnak pedig szintén  $\gamma$  szögben kell dőlnie, azaz párhuzamosak kell legyenek a belépőfelület burkolójával. Ekkor ugyanis a belépést követően szegmentálttá vált impulzusfront burkolója (amelyre merőlegesen terjed a keltett THz-es nyaláb) párhuzamos lesz a kristály be- és kilépőfelületével. Széles paramétertartományra kiterjedt szisztematikus modellszimulációk konk-

6. ábra. A plánparalel LN kristályon kialakított lépcsős rács prototípusának mikroszkópos képe (a). Egyetlen lépcső és annak profilja (b).





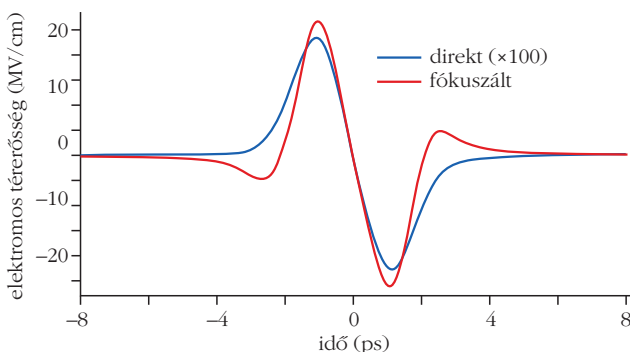
7. ábra. Az optikai rácsot és kis ékszögű lépcsős rácsot tartalmazó, leképező optikától mentes THz-es sugárforrás elvi vázlatja.

lúziói alapján 1% körüli konverziós hatások mellett több száz kV/cm-es csúcs elektromos térerősséget várhatunk. Centiméteres szélességű pumpálónyalábal pedig megközelíthető a mJ-os THz-es impulzusenergia-szint.

A lépcsős struktúra száz mikrométeres tartományba eső,  $w$  lépcsőszélességű lépcsőinek optikai minőségű mikromegmunkálása nem magától értetődő feladat. Az ipari partner (KUGLER GmbH) által ultraprecíz gyémántmaróval megmunkált mintadarabbal (amelynek mikroszkópos felvételei a 6. ábrán láthatóan) összeállított THz-es forrással sikerült THz-keltést demonstrálni. Hatásfokot tekintve szerényebben teljesített a forrás annál, ahogy azt előzetesen jósoltuk. Ennek oka többek közt a lekerekített lépcsőfok (6. ábra). Tervezzük a kristály nagyobb méretben való előállítását, és a technológia finomítását. Az impulzusalakot tekintve viszont az elméletileg jósolttal szinte tökéletesen megegyező, gyakorlatilag egyciklusú THz-es impulzusokat sikerült detektálnunk.

Az 5. ábrán látható leképezés elhagyásával még egyszerűbbé, kompaktabbá tehető az elrendezés, sőt a leképezési hibák korlátaitól is mentesülünk. Ennek ára viszont, hogy fel kell adnunk a kristály plánpáralel jellegét (7. ábra). Elméleti megfontolások és szimulációsorozatok eredményei alapján megmutattuk, hogy optimális (Littrow-elrendezésben használt rács) geometriával, kis értékű (jellemzően  $10^\circ$  alatti) ékszög

8. ábra. Terahertzes impulzusalak közvetlenül a kristályból történő kilépés után (kék), illetve fókuszálást követően (piros).



kialakításával néhány százalékos hatásokkal jó nyálábminőségű THz-es sugárzás kelthető [10].

A közelmúltban javasolt, úgynevezett hátoldali reflexiós lépcsősrács-sugárforrásunk [11] hatalmas előnye, hogy kompaktságában túlszárnyal valamennyi korábit. Egyetlen komponensből áll ugyanis, egy plánpáralel kristályból, amelynek hátoldala reflexiós lépcsős rácsként van megmunkálva. A működés alapelve hasonló a fent bemutatott lépcsős rácsokéhoz. További előnye, hogy a tökéletes THz-es nyálábminőség mellett biztosítja az energia felskálázhatóságát. A 8. ábra mutatja a THz-es impulzus numerikus szimulációval meghatározott térerősségfutását közvetlenül a kristályból történő kilépés után, illetve fókuszálás után a fókuszban. A 6 cm átmérőjű (FWHM) THz-es nyalábot 5 cm-es fókusztávolságú lencsével 1 mm átmérőjűre fókuszálva a fókuszbeli csúcs térerősségre 25 MV/cm-t kapunk, ami nagyságrendbeli növekedést jelent a korábbiakhoz képest. Az impulzus alakja tökéletesen alkalmas töltött részecskék gyorsítására.

E cikkben a történeti hűséget megőrizve prezentáltuk a döntött impulzusfrontú gerjesztési módszeren alapuló THz-es impulzusforrások fejlődését. A kutatófejlesztő munkát az alkalmazások igényei által vezérelt innovatív szemlélet uralta. A *Fizikai Szemle* későbbi számában e témához szorosan kapcsolódóan az extrém nagy elektromos térerősségű THz-es impulzusok részecskegyorsításra való alkalmazását szándékozzuk bemutatni.

## Irodalom

- Buzády A., Tóth Gy., Unferdorben M., Hebling J., Oláh L., Hajdara I., Mező E., Lemli B., Kunsági-Máté S., Pálfalvi L.: Dielektromos jellemzők meghatározása a terahertzes frekvenciartományban. *Fizikai Szemle* 66/12 (2016) 413.
- Z. Tibai, M. Unferdorben, Sz. Turnár, A. Sharma, J. A. Fülöp, G. Almási and J. Hebling: Relativistic electron acceleration by focused THz pulses. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 51 (2018) 134004.
- L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, Gy. Tóth, J. Hebling: Evanescent-wave proton postaccelerator driven by intense THz pulse. *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 17 (2014) 031301.
- D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, X. Wu, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L. E. Zapata, N. H. Matlis, F. X. Kärtner: Segmented terahertz electron accelerator and manipulator (STEAM). *Nature Photonics* 12 (2018) 336.
- Gy. Tóth, Z. Tibai, A. Sharma, J. A. Fülöp, J. Hebling: Single-cycle attosecond pulses by Thomson backscattering of terahertz pulses. *J. Opt. Soc. Am. B* 35 (2018) A103.
- J. Hebling, G. Almási, I. Kozma, J. Kuhl: Velocity matching by pulse front tilting for large area THz-pulse generation. *Opt. Express* 10 (2002) 1161.
- J. Hebling: Derivation of the pulse front tilt caused by angular dispersion. *Opt. Quantum Electron.* 28 (1996) 1759.
- J. A. Fülöp, Z. Ollmann, C. Lombosi, C. Skrobol, S. Klingebiel, L. Pálfalvi, F. Krausz, S. Karsch, J. Hebling: Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy. *Opt. Express* 22 (2014) 20155.
- B. K. Ofori-Okai, P. Sivarajah, W. Ronny Huang, K. A. Nelson: THz generation using a reflective staircase echelon. *Opt. Express* 24 (2016) 5057.
- Gy. Tóth, L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Krizsán, N. H. Matlis, G. Almási, J. Hebling: Numerical investigation of imaging-free terahertz generation setup using segmented tilted-pulse-front excitation. *Opt. Express* 27 (2019) 7762.
- Gy. Tóth, L. Pálfalvi, Z. Tibai, L. Tokodi, Z. Mártion, G. Almási, J. Hebling, *Opt. Express*, elbírálás alatt.