

ÚJ GENERÁCIÓS TERAHERTZES IMPULZUS FORRÁSOK

Tóth György^{1,2}, Pálfalvi László¹, Tibai Zoltán¹, Krizsán Gergő^{1,2}, Fülöp József András^{1,2},
Almási Gábor^{1,2}, Hebling János^{1,2,3}

¹PTE-TTK Fizikai Intézet, 7624 Pécs, Ifjúság u. 6, Magyarország

²Szentágothai János Kutatóközpont, 7624 Pécs, Ifjúság u. 20, Magyarország

³MTA-PTE Nagyintenzitású Terahertzes Kutatócsoport, 7624 Pécs, Ifjúság u. 6, Magyarország

DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9.35>

1. Bevezetés

Nagy energiájú terahertzes (THz-es) impulzusok előállításának elterjedt módja a lítium niobát (LN) kristályban történő döntött impulzusfrontú gerjesztés [1]. A technikát széles körben alkalmazzák olyan területeken, ahol egyciklusú, nagy térerősségű THz-es impulzusokra van szükség [2]. Közel tíz éve felvetődött annak a lehetősége, hogy extrém nagy térerősségek esetén a THz-es impulzusok alkalmasak lehetnek töltött részecskék manipulálására, gyorsítására is [3]. Ezen elképzelésre alapozva megszületett az első impulzus üzemű THz-es elektrongyorsító [4]. Számos tanulmány mutatott rá, hogy amennyiben a jelenleg előállított impulzusenergiáknál nagyobb energiájú THz-es impulzusokat tudnánk előállítani, úgy egyrészt jóval hatékonyabb gyorsítást érhetnénk el [5], másrészt új területek nyílhatnak meg a THz-es impulzusok alkalmazása számára [6-8].

A döntött impulzusfrontú elrendezés azonban nem alkalmas 1 mJ-nál jelentősen nagyobb energiájú THz-es impulzusok létrehozására [9-10]. Ezt a korlátot három fő okra vezethetjük vissza [10-11]: 1) a keltésre használt kristály nagy ékszögű prizma, így az THz-es nyaláb keresztiránya mentén a sugárzás különböző utakat tesz meg a kristályban. Ennek eredményeként a THz-es sugárzás térerősséglefutása nem lesz homogén a nyaláb keresztmetszete mentén. 2) A döntött impulzusfront előállítása jelentős szögdiszperzióval jár, mely rövid pumpáló impulzusok esetén az impulzusalak gyors megváltozásához vezet. Ez a hatás jelentősen redukálja a keltési hatásfokot. 3) A döntött impulzus kristályba való leképzéséből eredő leképzési hibák is jelentősen korlátozzák az alkalmazható pumpa nyalábméretét.

Ezen limitáló tényezőket igyekezett feloldani a közelmúltban számos új elképzelés [13-17], melyek közül a legpontosabb számítások alapján is [10] a Pécsi Tudományegyetemen tett javaslatoknak [14-17] valóban meghatározó szerepe lehet a nagy intenzitású THz-es impulzusok előállításának területén.

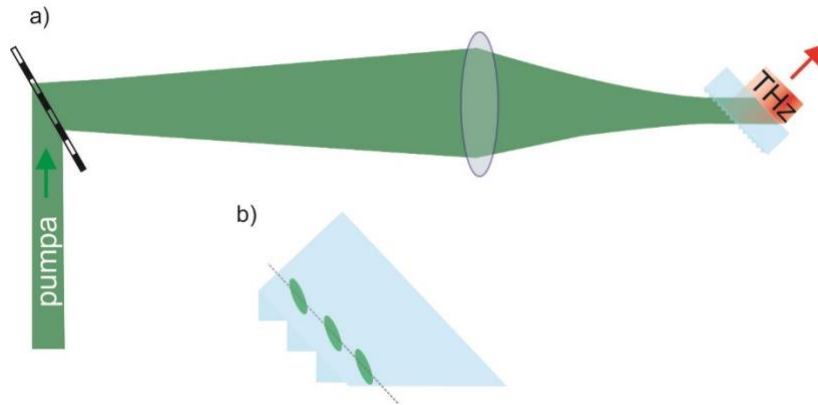
2. Eredmények

Három új típusú THz-es forrást javasoltunk a közelmúltban [14-16], melyek közül eddig egynek a működését demonstráltuk [18].

a.) NLES - leképzéssel

Az első javaslatunkat az 1. ábra mutatja be: a LN kristály rács felőli fala mikrostrukturált szerkezetű (tipikusan 50-70 μm -es lépcsők), és a LN döntve van olyan mértékben, amilyen mértékű impulzusfront döntésre van szükség a LN kristály belsejében a sebességillesztés megvalósítása érdekében [1,14]. A transzmissziós rács - lencse rendszer arra szolgál, hogy ugyanilyen mértékű impulzusfront dőléssel rendelkezzen a pumpáló impulzus mielőtt belép a LN kristályba. Így teljes mértékben megszüntettünk minden olyan problémát, melyet a nagy ékszögű prizma alakú kristály használata eredményezett, hiszen az alkalmazott kristály ezzel a megoldással sík-párhuzamos lehet.

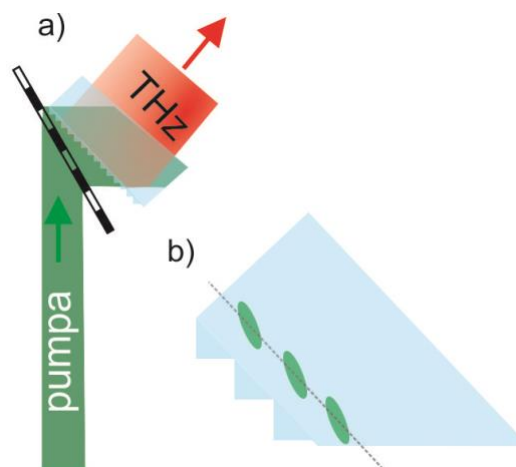
Ennél az elrendezésnél az optikai rács - lencse rendszernek jelentősen kisebb döntési szöggel rendelkező impulzusfrontot kell csak létrehoznia, mint a hagyományos elrendezés esetén. (A szükséges dőlési szögek tangenseinek aránya a LN csoporttörésmutatójával egyenlő.) Ez jelentősen megnövelt THz keltési hosszát eredményez. Ugyanakkor a LN kristályban létrehozott impulzusfront dőlése nem folytonos, hanem szegmentált (lásd 1. b ábra). Az elrendezéssel a THz-es energia tökéletesen skálázható a pumpa nyalábméretével egészen a leképzési korlátok megjelenéséig. Ez 200 fs-os impulzushossz esetén 2 cm-nél is nagyobb nyalábátmérőt jelent [14].



1. ábra. „NLES – leképzéssel” elrendezés (a) és a szegmentált döntött impulzusfront a kristályban (b)

b.) NLES - leképzés nélkül

Rámutattunk, hogy lehetőség van az NLES használatára abban az esetben is, ha elhagyjuk a leképző elemet [15] (2. ábra), ezzel megszüntetve a leképzésből eredő korlátozó tényezőket. A nagy diffrakciós hatások elérése érdekében elsősorban olyan geometriákat vizsgáltunk, amikor a pumpa nyaláb Littrow-szögben esik a rácsra. Ebben az esetben azonban a szükséges impulzusfront-döntés kialakításához le kell mondanunk arról, hogy a rács és a kristály oldalai mind párhuzamosak legyenek. Számításaink alapján Littrow-szögű elrendezés esetén jó hatásfokkal, jó minőségű THz-es nyaláb állítható elő 1030 nm-es pumpálási hullámhosszon 1570 vonal/mm karcolatsűrűségű rácsot használva. Ebben az esetben a pumpa 54° -os szöget zár be a diffrakciós rács normálisával, a rács és a kristály rács felőli felülete párhuzamos, a kristály hátlapja azonban 9° -os szöget zár be ezzel az előlappal.



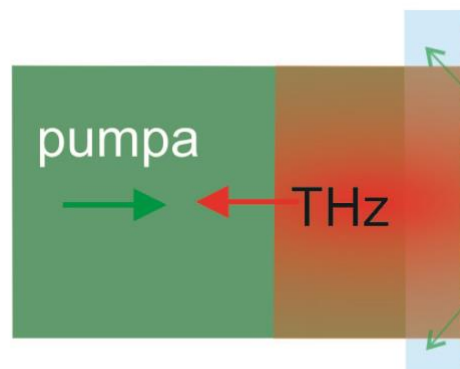
2. ábra „NLES – leképzés nélkül” elrendezés (a) és a szegmentált döntött impulzusfront a kristályban

Az elrendezés teljes mértékben megszünteti a leképzési hibákat, de csak redukálja (igen erős mértékben) a prizma alakból eredő problémákat. Amennyiben a diffrakciós rácsot nem Littrow-szögben használjuk, úgy megoldható, hogy a rács és a kristály oldalai is párhuzamosak legyenek egymással. Ilyen esetben a pumpa merőlegesen esik a 870 vonal/mm-es karcolatsűrűségű rácsra, a Littrow-szögtől való eltérés $26,5^\circ$ -os, mely közel 70%-os diffrakciós veszteséget okoz.

A két szélső helyzet között (Littrow szögű elrendezés, amikor a pumpa és a rács normálisa 54° -os szöget zár be egymással, illetve párhuzamos falú kristály párhuzamos rácsállással, amikor a pumpa merőlegesen esik a rácsra) számításaink alapján a legjobb kompromisszum, ha a Littrow-szögtől $\sim 10^\circ$ -al térünk el. Ez esetünkben 1360 vonal/mm-es karcolatsűrűségű rácsnál valósítható meg, melynek diffrakciós hatásfoka 80% körül van. A pumpa rácsra való beesésének szöge 35° , a kristály ékszöge $4,5^\circ$, mely jelentős nyalábminőség javulást és használható kristályfelület növelést tesz lehetővé [19]. Felvetődött térfogati holografikus rácsok használata is, mellyel jóval nagyobb hatásfokkal lehet elérni azt az esetet, amikor mind a kristály falai, mind a rács párhuzamosak.

c.) Reflexiós NLS

Az előzőektől eltérő koncepció a reflexiós NLS (Nonlinear Slab), mely egy, a hátoldalán reflexiós rácsként kialakított párhuzamos falú kristályból áll (3. ábra). A sebességillesztés itt a hagyományos döntött impulzusfrontú gerjesztéshez hasonlóan, egy rácsról történő diffrakciót követően alakul ki, de ezúttal ez a diffrakció nem a kristályon kívül, hanem a kristályban történik. A THz-keltés a hátoldalról történő diffrakciót követően kezdődik.



3. ábra Reflexiós NLS elrendezés. A balra haladó THz-es impulzust a kristály hátoldalán diffraktálódott, döntött, már balra haladó pumpa impulzus alakítja ki.

Az elrendezés mind az ékszögből, mind a leképzésből eredő problémákat megszünteti, azonban a szögdiszperzió ugyanúgy megmarad, mind a hagyományos döntött impulzusfrontú elrendezés esetén. A keletkező THz-es nyaláb azonban kiváló minőségű lesz, a keltési hatásfok reális értéke 1-2% körül lehet [9]. Egyszerűbb számítások, melyek nem veszik figyelembe a keletkező THz-es impulzus pumpára való visszahatását, ennél lényegesen nagyobb hatásfokot jósolnak [19]. Az elrendezés rendkívülisége, hogy szemben a korábbi technikákkal, itt semmilyen elvi korlát nincs, ami a használható pumpáló folt méretét korlátozná. Megfelelően nagy kristály esetén tehát reflexiós NLS esetén a THz-es energia a pumpáló impulzus energiájával skálázható.

Mivel még nem bizonyított, hogy a kristály felületén optikai minőségű rácsot tudnak létrehozni, olyan megoldást is javasoltunk, ahol a téglatest alakú kristályhoz illesztő folyadékkal illesztettünk egy külső

reflexiós rácsot [17]. Ez a megoldás nagyban megkönnyítheti ezen típusú THz-forrás tömeggyártását is.

3. Összefoglalás

Az elmúlt bő három évben olyan új LN alapú THz-es forrásokat fejlesztettünk ki, melyek a döntött impulzusfrontú technikához hasonlóan mérföldkövet jelenthetnek a nagy energiájú THz-es impulzusok előállításának a területén. A három különböző forrás különböző felhasználási lehetőségeket biztosít. Míg a leképzéses NLES-el néhány mJ-os, tökéletes minőségű, egyciklusú THz-es nyalábokat lehet előállítani, addig a leképzés nélküli forrással (egy kismértékű nyalábminőség romlás mellett) jelentősen megnövelhető a THz-keltésre használt kristályfelület és ezzel együtt a keltett THz-es impulzus energiája. A reflexiós NLS esetén semmilyen korlátozó tényező nincs a pumpáló nyaláb keresztmetszetét tekintve, a THz-es impulzusok energiája a pumpáló lézer energiájával skálázható. A nyalábminőség tökéletes (a térerősség időbeli lefutása mindenhol azonos a nyaláb keresztmetszete mentén), ám egyciklusú impulzusokat csak hosszabb (~500-700 fs) pumpáló impulzusok esetén állíthatunk elő.

Köszönetnyilvánítás

A munkát az EFOP-3.6.2-16-2017-00005 azonosító számú, Ultra-gyors fizikai folyamatok atomokban, molekulákban, nanoszerkezetekben és biológiai rendszerekben című projekt, az 125808 számú Terahertzes részecskegyorsítás című OTKA-pályázat, és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (T. Gy.) támogatta.

Irodalom

- [1] J. Hebling, G. Almási, I. Z. Kozma and J. Kuhl, *Opt. Express* **10**, 1161-1166 (2002).
<https://doi.org/10.1364/OE.10.001161>
- [2] P. Sanén, M. Basini, S. Bonetti, J. Hebling, M. Krasilnikov, A. Y. Nikitin, G. Shamuilov, Z. Tibai, V. Zhaunerchyk, and V. Goryashko, *Phys. Rep.* **836-837**, 1-74 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.09.002>
- [3] J. Hebling, J. A. Fülöp, M. I. Mechler, L. Pálfalvi, C. Tőke, and G. Almási, arXiv:1109.6852 (2011).
- [4] E. A. Nanni, W. R. Huang, K.-H. Hong, K. Ravi, A. Fallahi, G. Moriena, R. J. D. Miller, and F. Kärtner, *Nat. Commun.* **6**, 8486 (2015).
<https://doi.org/10.1038/ncomms9486>
- [5] Z. Tibai, M. Unferdorben, Sz. Turnár, A. Sharma, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, *J. Phys. B* **51**, 134004 (2018).
<https://doi.org/10.1088/1361-6455/aac1f2>
- [6] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, Gy. Tóth, and J. Hebling, *Phys. Rev. Spec. Top.-AC* **17**, 031301 (2014).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.17.031301>
- [7] Gy. Tóth, Z. Tibai, A. Sharma, J. A. Fülöp, and J. Hebling, *J. Opt. Soc. Am. B* **35**, A103-A109 (2018).
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.35.00A103>

- [8] C. Hwayeong, Y. Hee-Jin, C. Moran, and S. Joo-Hiuk, *Biomed. Opt. Express* **10**, 4931-4941 (2019).
<https://doi.org/10.1364/BOE.10.004931>
- [9] K. Ravi, W. R. Huang, S. Carbajo, X. Wu, and F. Kärtner, *Opt. Express* **22**, 20239-20251 (2014).
<https://doi.org/10.1364/OE.22.020239>
- [10] L. Wang, Gy. Tóth, J. Hebling, and F. Kärtner, *Laser Photonics Rev.* **14**, 2000021 (2020).
<https://doi.org/10.1002/lpor.202000021>
- [11] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **18**, 12311-12327 (2010).
<https://doi.org/10.1364/OE.18.012311>
- [12] B. K. Ofori-Okai, P. Sivarajah, W. R. Huang, K. A. Nelson, *Opt. Express* **24**, 5057-5068 (2016).
<https://doi.org/10.1364/OE.24.005057>
- [13] Y. Avetisyan, A. Makaryan, V. Tadevosyan, and N. Tonouchi, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **38**, 1439-1447 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s10762-017-0429-3>
- [14] L. Pálfalvi, Gy. Tóth, L. Tokodi, Zs. Márton, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **25**, 29560-29573 (2017).
<https://doi.org/10.1364/OE.25.029560>
- [15] Gy. Tóth, L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Krizsán, N. H. Matlis, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **27** 7762-7775 (2019).
<https://doi.org/10.1364/OE.27.007762>
- [16] Gy. Tóth, L. Pálfalvi, Z. Tibai, L. Tokodi, J. A. Fülöp, Zs. Márton, and J. Hebling, *Opt. Express* **27**, 30681-30691 (2019).
<https://doi.org/10.1364/OE.27.030681>
- [17] G. Krizsán, Z. Tibai, J. Hebling, L. Pálfalvi, G. Almási, and Gy. Tóth, *Opt. Express* **28**, 34320-34327 (2020).
<https://doi.org/10.1364/OE.405748>
- [18] P. S. Nugraha, G. Krizsán, Cs. Lombosi, L. Pálfalvi, Gy. Tóth, G. Almási, J. A. Fülöp, and J. Hebling, *Opt. Lett.* **44**, 1023-1026 (2019).
<https://doi.org/10.1364/OL.44.001023>
- [19] G. Illés, S. Balázs, M. Anna, Z. Tibai, L. Pálfalvi, G. Almási, J. Hebling, and Gy. Tóth, előkészítés alatt.