

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Impulzushossz és hőmérséklet hatásai nagyenergiájú lítium-niobát alapú terahertzes forrásokra

PhD értekezés

Lombosi Csaba



Témavezetők:

Dr. Fülöp József András

Dr. Hebling János

tudományos főmunkatárs

egyetemi tanár

Pécs, 2017

1. ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az utóbbi évtizedekben kifejlesztett nagyintenzitású, egyciklusú terahertzes (THz) forrásoknak köszönhetően új kutatási területek is megjelentek. A fejlődésnek köszönhetően olyan alkalmazások váltak elérhetővé, mint a THz sugárzással segített attoszekundumos impulzusok keltése [1], THz pumpa – THz próba mérések [2], molekula-orientációs kísérletek intenzív terekben [3]. A jelenleg még nem előállítható, nagy térerősséggel rendelkező források további felhasználási területek elterjedését tennék lehetővé, mint a relativisztikus elektroncsomók gyorsítása és manipulálása [4-6], lézerrel keltett protonok és ionok utógyorsítása [7], és az egylövéses multispektrális képalkotás.

Napjainkban a nagy térerősségű terahertzes források a MV/cm tartományban csak magasabb frekvenciákon

érhetőek el [8]. Félvezető [8] és organikus kristály alapú terahertzes források [9-11] a magas nemlineáris együttthatójuknak köszönhetően jó keltési hatásfokkal rendelkeznek, azonban csak magasabb frekvenciákon működnek (1 THz – 10 THz). Ebből adódóan a keltett nyaláb jól fókuszálható és nagy térerősségeket lehet elérni. Habár az alacsonyabb frekvenciákon (0.1 THz – 2 THz) működő források előnyösebbnek mutatkoznak az említett kutatási területek számára – mivel a hosszabb hullámhossz jobban illeszkedik a részecskesugarak transzverzális méretéhez -, ezen forrásokkal keltett impulzusenergiák és térerősségek még nem elegendőek. A cink-tellurid (ZnTe) alapú források jó tulajdonságokkal rendelkeznek, nagy terahertz energia azonban csak a háromfotonos abszorpciós limit feletti pumpálás esetén érhető el [12]. Döntött impulzusfrontú elrendezésben [13]

hűtött lítium-niobát (LiNbO_3 , LN) oxidkristályt használva jó keltési hatások érhetőek el, mely alapján nagy terahertz energiák érhetőek el a 0.1 THz - 1 THz frekvenciatartományon.

Ezért célom, hogy optimalizáljam a lítium-niobátban femtoszekundumos lézerimpulzusok optikai egyenirányításával döntött impulzusfrontú elrendezésben keltett terahertzes forrásokat [13]. Elméleti számítások alapján konverziós hatások növekedés várható optimális pumpáló impulzushosszak és a LN forrás kristály kriogenikus hűtése esetén [14-16]. Az elméleti eredmények bizonyításául kísérleteket végeztem döntött impulzusfrontú terahertzes forrásokon különböző elrendezések segítségével, több különböző pumpáló impulzushosszat, kristályhőmérsékletet és leképezési konfigurációt használva.

2. MÓDSZEREK

Az elméleti eredményeket [14] melyek megjósolták, hogy az egyciklusú terahertzes impulzusok konverziós hatásfoka növelhető, a következő kísérletek elvégzésével bizonyítottam:

- (i) vizsgáltam lítium-niobát alapú terahertzes forrásokat olyan elrendezésben, ahol a forrás kristály 0.39 ps és és 0.65 ps közötti transzformáció-limitált impulzusokkal volt megvilágítva, összesen 15 mJ impulzusenergiával, 1030 nm központi hullámhosszal, és meghatároztam a hatékony THz keltéshez szükséges optimális pumpáló impulzushosszat.

(ii) vizsgáltam kriogenikus hőmérsékletre hűtött lítium-niobát alapú terahertzes forrásokat és kiszámoltam a két hőmérsékleten mért hatásfok arányát (η_{CT}/η_{RT}) közepes ($45 \mu\text{J}$) és nagy ($50 - 180 \mu\text{J}$) terahertzes impulzusenergiákra.

(iii) terahertzes hullámformákat mértem elektrooptikai mintavételezéssel, az elérhető legnagyobb impulzusenergiákon, alacsony frekvenciatartomány esetén.

A továbbiakban összehasonlítottam két terahertzes forrást, melyek optimális leképezési paraméterek alapján voltak felépítve. A kísérlet során alacsony terahertzes frekvenciájú, döntött impulzusfrontú elrendezésben felépített forrásokról hasznos információkhoz jutottunk.

Az első elrendezés esetében kétlencsés leképezést, míg a második esetben egylencsés leképezést építettem fel. Megvalósítottam az elrendezések térbeli karakterizálását lehetővé tevő elrendezést és a forrásokhoz kapcsolódó elektro-optikai elrendezést, hogy nyalábdivergencia és foltméret ellipticitás-változást tudjak vizsgálni különböző pumpáló intenzitások esetén. Ezen információk kiemelt fontosságúak nyalábfókuszálást és nyalábterjedést érintő tervezésekkor.

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

I. Kriogenikus hőmérsékletre hűtött lítium-niobátban történő, ultrarövid impulzusok optikai egyenirányításán alapuló THz-es forrást vizsgáltam annak érdekében, hogy növeljem a pumpa – THz energia konverziós hatásfokát különböző hosszúságú transzformáció-limitált impulzusok segítségével. Megmutattam, hogy az elméleti számolásokkal összhangban, a hosszabb impulzusok segítségével nagyobb konverziós hatásfok érhető el [S1]. Ezenkívül kísérletileg is bizonyítottam, hogy rövidebb impulzusok használatával nagyobb terahertzbeli sáv szélesség érhető el.

II. Döntött impulzusfronton alapuló, kriogenikus hőmérsékletre hűtött lítium-niobátban történő THz keltés hatásfokát vizsgáltam különböző elrendezésekben.

Megmutattam, hogy hűtés hatására a konverziós hatások a szobahőmérsékleti hatásokhoz képest akár négyszeres is lehet $45\mu\text{J}$ THz impulzusenergiáig, míg $50\mu\text{J}$ és $180\mu\text{J}$ impulzusenergia között 2.4-szeres javulást sikerült elérni.

[S1, S2]

III. Döntött impulzusfronton alapuló, szobahőmérsékletű lítium-niobát kristályt megvilágítva nagyenergiájú és nagy intenzitású pumpáló lézerrel, optimális leképezést és közel optimális impulzushosszt használva megmutattam, hogy a keltési hatások 0.77% is lehet, elérve a 0.4 mJ impulzusenergiát, ami adott frekvenciatartományban az elért legnagyobbak számít.

[S2]

IV. Elsőként keltettem terahertzes impulzusokat olyan paraméterekkel, amelyek megfelelőnek bizonyulnak töltött részecskék gyorsítására, mint például evaneszcens

terahertzes hullámokkal történő proton utógyorsításra. Lítium-niobát alapú, kriogenikus hőmérsékletre hűtött terahertzes forrás segítségével lefókuszált hullámformákat mértem 0.2 THz spektrális csúccsal és 0.65 MV/cm számolt csúcs-térerősséggel. [S2]

V. Kísérletileg megvizsgáltam THz-es források közeltérbeli nyalábképét. Méréseim alapján elmondható, hogy növelve a pumpáló intenzitást, a terahertzes nyaláb horizontális diszperzió síkjába eső mérete csökken, az erre merőleges vertikális irányú síkban azonban nem tapasztalható változás. Folytatva a vizsgálatokat megmutattam, hogy a horizontális irányban a nyaláb divergenciaszöge növekszik, míg a vertikális irányban szintúgy nincs számottevő változás [S3]. Eredményeim megmutatták, hogy nagyenergiájú források és hozzájuk

kapcsolódó elrendezések tervezésénél elengedhetetlen a nemlineáris nyálbváltozások figyelembevétele.

4. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

[S1] C Vicario, B Monoszlai, **Cs Lombosi**, A Mareczko, A Courjaud, JA Fülöp, CP Hauri, *“Pump pulse width and temperature effects in lithium niobate for efficient THz generation”* Optics Letters 38 (24), 5373-5376

[S2] JA Fülöp, Z Ollmann, **Cs Lombosi**, Ch Skrobol, S Klingebiel, L Pálfalvi, F Krausz, S K, J Hebling, *“Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy”*, Optics Express 22 (17), 20155-20163

[S3] **C Lombosi**, G Polónyi, M Mechler, Z Ollmann, J Hebling, JA Fülöp, *“Nonlinear distortion of intense THz beams”*, New Journal of Physics 17 (8), 083041

5. EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

[S4] W.Schneider, A Ryabov, Cs **Lombosi**, T Metzger, Zs Major, JA Fülöp, Peter Baum, “*800-fs, 330- μ J pulses from a 100-W regenerative Yb: YAG thin-disk amplifier at 300 kHz and THz generation in LiNbO₃*”, Optics Letters 39 (23), 6604-6607

6. HIVATKOZÁSOK

- [1] E. Balogh, K. Kovacs, P. Dombi, J. A. Fulop, G. Farkas, J. Hebling, V. Tosa, and K. Varju, *Physical Review A* **84**, 023806 (2011).
- [2] J. Hebling, M. C. Hoffmann, H. Y. Hwang, K.-L. Yeh, and K. A. Nelson, *Physical Review B* **81**, 035201 (2010).
- [3] S. Fleischer, Y. Zhou, R. W. Field, and K. A. Nelson, *Physical Review Letters* **107**, 163603 (2011).
- [4] J. Hebling, J. A. Fülöp, M. I. Mechler, L. Pálfalvi, C. Töke, and G. Almási, *arxiv.org* (2011).
- [5] L. J. Wong, A. Fallahi, and F. X. Kärtner, *Opt. Express* **21**, 9792 (2013).
- [6] Z. Tibai, L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, in *4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology* Camogli, Italy, (2014).

- [7] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Tóth, and J. Hebling, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* **17**, 031301 (2014).
- [8] A. Sell, A. Leitenstorfer, and R. Huber, *Opt. Lett.* **33**, 2767 (2008).
- [9] A. Schneider, M. Neis, M. Stillhart, B. Ruiz, R. U. A. Khan, and P. Günter, *J. Opt. Soc. Am. B* **23**, 1822 (2006).
- [10] C. P. Hauri, C. Ruchert, C. Vicario, and F. Ardana, *Applied Physics Letters* **99**, 161116 (2011).
- [11] C. Vicario, B. Monoszlai, and C. P. Hauri, *Physical Review Letters* **112**, 213901 (2014).
- [12] G. Polonyi *et al.*, (2016).
- [13] J. Hebling, G. Almási, I. Z. Kozma, and J. Kuhl, *Opt. Express* **10**, 1161 (2002).

- [14] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling, *Opt. Express* **18**, 12311 (2010).
- [15] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, M. C. Hoffmann, and J. Hebling, *Opt. Express* **19**, 15090 (2011).
- [16] M. I. Bakunov, S. B. Bodrov, and E. A. Mashkovich, *J. Opt. Soc. Am. B* **28**, 1724 (2011).