

# PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Nemlineáris optika és spektroszkópia program

## Terahertzes impulzusokkal történő részeckegeyorsítás szimulációi

PhD értekezés tézisei

**Turnár Szabolcs Tamás**

Témavezető:

**Dr. Tibai Zoltán**

egyetemi adjunktus

**PTE TTK Fizikai Intézet**



**PÉCS, 2022**

# 1. Előzmények

Az utolsó két évtizedben a THz-es tudomány jelentős fejlődésen ment keresztül, mely számos új lehetőséget nyújtott a töltött részecskék hatékony gyorsítására és manipulálására. A THz-es technikák és eszközök széleskörű alkalmazhatóságát a femtoszekundumos ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) lézereken alapuló THz-es források megjelenése tette lehetővé. Az elmúlt egy évtizedben a különböző technikákkal generált THz-es impulzusok energiája körülbelül 7 nagyságrenddel nőtt, ezzel elérve az 1 mJ-os energiát, valamint a  $100 \frac{\text{MV}}{\text{cm}}$ -es csúcs elektromos térerősséget [1].

Az elektromágneses spektrum tanulmányozása során a rádióhullám és az infravörös tartomány között elhelyezkedő terület sokáig nem volt kutatott a felhasználási lehetőségek tekintetében. Ez az úgynevezett terahertzes tartomány, melynek számos előnyét használják ki jelenleg is a részecskegyorsítás területén. Előnyei közé tartozik a közeli infravörös tartományon működő lézerekhez viszonyított aránylag hosszú hullámhossza, melynek nagy szerepe van az időbeli szinkronizálás során. Mindezek mellett a terahertzes sugárzás alkalmazása lehetővé teszi, hogy a gyorsítási határfok növelése érdekében megtervezett hullámvezetők és dielektrikumos struktúrák a méretükből kifolyólag hagyományos technikákkal is megmunkálhatóak legyenek. Egy terahertzes sugárzással hajtott

részecskegyorsító berendezés további előnyei közé sorolható a néhány fC – néhány nC-os tartományban változtatható töltés.

A THz-es források fejlődésével párhuzamosan a THz-es impulzusokkal történő részecskemanipuláció [2-8], a lézerrel hajtott részecskegyorsítók [9, 10], a dielektrikus részecskegyorsítás [11-13], valamint a röntgensugárzást előállító technikák és eszközök területén is jelentős fejlődés volt tapasztalható [14, 15]. A folyamatos fejlődést jól szemléltetik az elektronemisszió [16, 17], az elektrongyorsítás [18-21], valamint az elektroncsomó-kompresszió [22, 23] és az úgynevezett streaking [24, 25] alkalmazási területeken elvégzett friss szimulációs és a gyakorlatban is megvalósított kísérleti berendezések által kapott eredmények.

Az elmúlt pár évtizedben rengeteg új ötlet és gyakorlati megvalósítás született a THz-es sugárzással hajtott részecskegyorsítók gyorsítási hatásfokának növelése érdekében. Doktori értekezésemben az általunk javasolt modellek [2, 3] mellett ezek közül mutatok be néhányat, melyek a közeljövőben elérhető néhány mJ – néhány 10 mJ energiájú THz-es impulzusok felhasználásával MeV-os végső kinetikus energiákat jósolnak elektronok esetében.

## 2. Célkitűzés

Egy kompakt asztali méretű részecskegyorsító megtervezése és optimalizálása számos paraméter optimális értékének meghatározásával lehetséges. Az én feladatom elsődlegesen ezen paraméterek numerikus szoftverek segítségével történő meghatározása. Feladataim közé tartozik továbbá a modellek optimalizálása és a felparaméterezett kompakt elektronyorsító berendezés kísérleti megvalósításának előkészítése.

A megfelelő hatásfokú gyorsítás eléréséhez elengedhetetlen egy nagy energiájú, néhány – néhány 10 MV/cm-es csúcs térerősségű és közel egyciklusú THz-es impulzus előállítás. A csúcs elektromos térerősség értékének növelése az impulzusok erős fókuszálásával lehetséges. Ebben a dolgozatban célul tűzöm ki a THz-es sugárzás fókuszálásának és annak a THz-es nyalábra, valamint a gyorsítási hatásfokra vett hatásának részletes tanulmányozását.

A megfelelő gyorsítási hatásfok elérésének további feltétele a THz-es sugárzás hullámhosszának a kezdeti elektroncsomó méretéhez való igazodása. Számolásaim során ez tipikusan néhány 10-100 mikrométeres csomóméretet, azaz maximálisan körülbelül 0,1 – 1 THz központi frekvenciájú sugárzás alkalmazhatóságát jelenti. Munkám során célul tűzöm ki a kezdeti csomóméretnek, valamint a kezdeti csomó

töltésének változtatásával járó hatások megfigyelését és az optimális paraméterek meghatározását a felgyorsított elektroncsomag térbeli energiaeloszlására és energiaszórására vonatkozóan különböző frekvenciájú THz-es impulzusok esetén.

Mindezek mellett további célul tűzöm ki az egyciklusú impulzusok vivő-burkoló fázisának változtatásával járó hatások megfigyelését és az optimális paraméter meghatározását az elektronok végső kinetikus energiájának maximalizálása érdekében. További célul tűzöm ki a THz-es impulzusok számának és azok terjedési irányának változtatásával járó hatások tanulmányozását a gyorsítási gradiens tekintetében.

Kutatásaim további fő céljaként vizsgálom egy darab elektron és egy elektroncsomag utógyorsításának optimalizációját. A transzverzális irányú csomókompresszió tekintetében alkalmazható technikák tanulmányozását követően célul tűzöm ki egy többretegű mágnestekercs fókuszáló hatásának vizsgálatát. A THz-es sugárzással történő csomókompressziós technikák tanulmányozását követően célul tűzöm ki különböző kezdeti energiájú és különböző kezdeti mérettel rendelkező elektroncsomók hosszirányú kompressziójának korlátainak feltárását, valamint az általam tervezett részecskegyorsító berendezés által jósolt elektroncsomó megfelelő hatásfokú fókuszálásához szükséges paraméterek optimalizálását.

### 3. Tézisek

- I. Számítógépes szimulációim segítségével megmutattam, hogy két egymással szemben haladó THz-es impulzus segítségével nyugvó ( $<10$  eV kezdeti energiájú) elektronokat néhány 10, illetve néhány 100 keV energiára lehet gyorsítani az impulzusok interakciós pontba való érkezési idejének és az elektronok keletkezési idejének megfelelő szinkronizációjával. Meghatároztam a fókuszált impulzus nyalábnyak méretének hatását az elektronok végső kinetikus energiájára vonatkozóan. Numerikus szimulációim segítségével megmutattam, hogy a gyorsítást követően az elektronok kinetikus energiája a nyalábnyak négyzetének inverzével lesz arányos. Vizsgálataimat 0,14 THz, 0,3 THz, 0,7 THz és 3,0 THz-es központi frekvenciával rendelkező, közel egyciklusú és 1 mJ energiájú impulzusokkal végeztem. Megmutattam, hogy a vizsgált impulzusok esetén az elektronok kinetikus energiája 28 keV, 41 keV, 75 keV és 133 keV [S2].
- II. Numerikus szimulációim segítségével megmutattam, hogy a kezdetben két egymással szemben haladó terahertzes impulzus haladási irányát — az elektron kitüntetett haladási irányával ellentétes irányba — megdöntve megnövelhető a kezdetben álló helyzetben lévő elektronok gyorsítási határfoka. A 0,14 THz, 0,3 THz, 0,7 THz és 3,0 THz-es központi frekvenciával rendelkező, közel egyciklusú és 1 mJ energiájú

impulzusok esetén meghatároztam az optimális döntési szöveget és az így előállítható végső kinetikus energiákat egy darab elektron esetén. Az optimális dőlésszögek 0,14 THz, 0,3 THz, 0,7 THz és 3,0 THz központi frekvenciájú impulzusok esetén a következők:  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ , míg a relatív energianövekmények 1,0 keV, 2,4 keV, 6,4 keV és 20,5 keV. A 3,0 THz központi frekvenciájú impulzus esetén kaptam a legnagyobb relatív energianövekményt, mely 15 % az elektronok kitüntetett haladási irányára merőlegesen haladó impulzusok által meghatározott esethez képest [S2].

III. Megvizsgáltam 0,14 THz, 0,3 THz és 0,7 THz-es központi frekvenciájú és közel egyciklusú impulzusokkal történő elektrongyorsítás esetén az impulzusok vivő-burkoló fázisának változtatásával járó hatásokat az elektronok végső kinetikus energiájára vonatkozóan. Numerikus szimulációim segítségével meghatároztam a vivő-burkoló fázis optimális értékeit, valamint az így kapott maximális elektronenergiákat. Hullámhosszra való fókuszálást és 1 mJ-os impulzusenergiát, valamint az optimális dőlési szögeket ( $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ) feltételezve a 0,14 THz, 0,3 THz és 0,7 THz-es központi frekvenciájú impulzusok esetén a kezdeti fázis optimális értékei  $-29^\circ$ ,  $36^\circ$  és  $-49^\circ$ , míg a fázis változtatásából adódó relatív energianyereségek 10 %, 35 % és 20 % [S2].

IV. Numerikus szimulációimmal megmutattam, hogy az általunk javasolt elrendezés kezdeti energiával rendelkező

elektronok utógyorsítására is alkalmas abban az esetben, ha a fókuszált THz-es impulzus fókuszfoltjának megfelelő részének kitakarásával – mely megvalósítható lítium-niobát, poli(metilmetakrilát), polimetilpentén vagy fémből készült lapkák segítségével – csökkentjük a gyorsításra negatív hatással lévő elektromos térerősségkomponensek hatását. Optimalizálási folyamatom során 30 keV, 100 keV, 500 keV, 1000 keV és 2000 keV kezdeti energiájú elektronok esetén meghatároztam az optimális impulzusedöntési szögeket és az így kapott elektron-energianövekményeket 0,3 THz központi frekvenciájú, 0,5 mJ energiájú és hullámhosszra fókuszált THz-es impulzusok (4 db) esetén. Az optimális döntési szögek  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $68^\circ$ ,  $75^\circ$  és  $79^\circ$ , valamint a hozzájuk tartozó relatív energianövekmények 44 keV, 106 keV, 430 keV, 771 keV és 1205 keV [S1, S2].

V. Numerikus szimulációkkal megvizsgáltam az általunk javasolt elrendezéssel gyorsított elektronok energiaspektrumának szélességének a csomó kezdeti töltésétől való függését konstans kezdeti csomóméret mellett. Az elrendezés esetén két pár egymással szemben haladó THz-es impulzus gyorsít különböző töltéssűrűséggel rendelkező elektroncsomókat, melyek térbeli félértékszélessége  $33 \mu\text{m}$ . Az optimalizált első gyorsítási szakaszt követően a  $64,3 \frac{n\text{C}}{\text{cm}^3}$  töltéssűrűségű elektroncsomag átlagos kinetikus energiája  $\sim 80$



keV, energiaeloszlása pedig 1.0 %. Szimulációs eredményeim segítségével megmutattam, hogy a kezdetben  $64,3 \frac{nC}{cm^3}$  értékben meghatározott töltéssűrűséget 2,5, 5, 10 és 25 - szörösére növelve a végső energiaspektrum szélessége a kezdeti esethez képest 2, 4, 5, valamint 9 -szeresére nő. A töltéssűrűséget negyedére csökkentve az energiaspektrum szélessége nem változik, értéke körülbelül 1% [S1].

VI. Numerikus szimulációk segítségével megmutattam, hogy az általunk javasolt elrendezés elektroncsomó longitudinális összenyomására is alkalmas. Megmutattam, hogy a fénysebesség felével (80 keV), valamint a fénysebesség 80 %-ának (346 keV) megfelelő átlagos sebességgel haladó elektroncsomók terahertzes impulzussal történő longitudinális kompressziója lehetséges. Két pár, páronként egymással szemben haladó 0,3 THz központi frekvenciájú THz-es impulzust tételeztem fel az elektroncsomó terjedési irányára merőleges haladási iránnyal. A 80 keV-os csomó esetén az eredeti 1233 fs-os hossz közel a felére, 667 fs-ra, míg a 346 keV-os csomó hossza 667 fs-ról 200 fs-ra csökkent, azaz kevesebb, mint a harmada lett. A csomók hosszirányú összenyomása nagy jelentőséggel bír az utógyorsítás megfelelő hatásfokának növelésében és a részecskegyorsító berendezés által jósolt ultrarövid hossz elérésében [S1].

## 4. Publikációk listája

### Saját közlemények

Négy éves kutatói munkám során 27 alkalommal kerültek bemutatásra eredményeim nemzetközi és hazai konferenciákon.

i. Az értekezéshez kapcsolódó saját publikációk

a) Referált folyóiratban megjelent publikációk

[S1] **Sz. Turnár**, J. Hebling, J.A. Fülöp, Gy. Tóth, G. Almási, Z. Tibai, „Design of a THz-driven compact relativistic electron source”, Applied Physics B, **127**, 38 (2021).

[S2] Z. Tibai, M. Unferdorben, **Sz. Turnár**, A. Sharma, J.A. Fülöp, G. Almási, J. Hebling, „Relativistic electron acceleration by focused THz pulses”, Journal Physics B: At. Mol. Opt. Phys. **51** 134004 (8pp) (2018).

b) Előadások

[E1] L. Pálfalvi, Z. Tibai, J. A. Fülöp, Gy. Tóth, G. Krizsán, **Sz. Turnár**, G. Almási, J. Hebling,

„Application Possibilities of High Energy Terahertz Pulses in Particle Acceleration”, In: [s.n.] (szerk.) Kvantumelektronika 2018: VIII. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről Budapest, Magyarország, 2018.06.15 Pécs: Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar (PTE TTK), 2018. Paper E-7. 2p. (ISBN:978-963-429-250-0).

[E2] Z. Tibai, M. Unferdorben, **Sz. Turnár**, A. Sharma, B. Kovács, J. A. Fülöp, G. Almási, J. Hebling, „THz-pulse-driven electron post-accelerators” In: The Optical Society (szerk.) High Intensity Lasers and High Field Phenomena (HILAS): Proceedings High-Brightness Sources and Light-driven Interactions Strasbourg, Franciaország, 2018.03.26 -2018.03.28. Washington: The Optical Society, 2018. Paper HM3A.4. (Optics InfoBase Conference Papers), (ISBN:978-1-943580-40-8).

[E3] **Turnár Szabolcs**, Tibai Zoltán, Ashutosh Sharma, Almási Gábor, Fülöp József, Hebling János, „THz-driven electron acceleration setup in vacuum”, (dof)φ -A Fizikus Doktoranduszok Konferenciája (DOFFI 2018), június 14. - június 18. (2018), Balatonfenyves.

[E4] **Turnár Szabolcs**, Ashutosh Sharma, Fülöp József, Almási Gábor, Hebling János, Tibai Zoltán, „Compact THz-driven electron accelerators”, Hamburg, 8th Topical Workshop on Longitudinal Diagnostics for FELs, Június 25 - Június 28 (2018).

[E5] Tibai Zoltán, **Turnár Szabolcs**, Ashutosh Sharma, Almási Gábor, Fülöp József, Kovács Bálint, Hebling János, „Compact Setup for Electron Acceleration by Intense THz Pulses”, Bécs, EMN Meeting on Vacuum Electronics, (EMN 2018), Június 18 - Június 22 (2018).

[E6] **Turnár Szabolcs**, Kovács Bálint, Fülöp József, Almási Gábor, Hebling János, Tibai Zoltán, „Electron acceleration based on THz pulses”, Pécs, XVI. János Szentágothai Multidisciplinary Conference and Student Competition, Február 14 – Február 15. (2019), Pécs, Magyarország.

[E7] **Turnár Szabolcs**, Kovács Bálint, Fülöp József, Almási Gábor, Hebling János, Tibai Zoltán, „Possibilities of electron acceleration based on THz pulses”, 5th International Cholnoky Symposium, Április 25 – 26. (2019), Pécs, Magyarország.

ii. Egyéb közlemények

a) Referált folyóiratban megjelent publikációk

[S3] **Turnár Szabolcs**, Krizsán Gergő, Hebling János, Tibai Zoltán, „Waveguide structure based electron acceleration usin THz pulses”, Optics Express, accepted (2022)

[S4] Zoltán Tibai, **Szabolcs Turnár**, György Tóth, János Hebling, Spencer W. Jolly, „Spatiotemporal modeling of direct acceleration with high-field terahertz pulses”, Optics Express, accepted (2022)

[S5] Gy. Tóth, L. Pálfalvi, **Sz. Turnár**, Z. Tibai, G. Almási and J. Hebling, “Performance comparison of lithium-niobate-based extremely high-field single-cycle terahertz sources,” Chinese Opt. Lett. 19, 111902 (2021).

[S6] Tibai Zoltán, **Turnár Szabolcs**, Kovács Bálint, Pálfalvi László, Almási, Gábor, Hebling, János, Részecskegyorsítás extrém nagy térerősségű terahertzes impulzusokkal, FIZIKAI SZEMLE 71: 2 pp. 47-52., 6 p. (2021).

## Irodalomjegyzék

- [1] Gyula, P., *Extrém nagy hatásfokú félvezető anyagú terahertzes források*. 2018.
- [2] Tibai, Z., et al., Relativistic electron acceleration by focused THz pulses. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2018. **51**(13): p. 134004.
- [3] Turnár, S., et al., *Design of a THz-driven compact relativistic electron source*. *Applied Physics B*, 2021. **127**(3): p. 1-7.
- [4] Fallahi, A., et al., Short electron bunch generation using single-cycle ultrafast electron guns. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016. **19**(8): p. 081302.
- [5] Nanni, E.A., et al., *Terahertz-driven linear electron acceleration*. *Nature communications*, 2015. **6**(1): p. 1-8.
- [6] Hebling, J., et al., *Optical manipulation of relativistic electron beams using THz pulses*. arXiv preprint arXiv:1109.6852, 2011.
- [7] Huang, W.R., et al., *Toward a terahertz-driven electron gun*. *Scientific reports*, 2015. **5**(1): p. 1-8.
- [8] Huang, W.R., et al., *Terahertz-driven, all-optical electron gun*. *Optica*, 2016. **3**(11): p. 1209-1212.
- [9] Wong, L.J., et al., *Laser-induced linear-field particle acceleration in free space*. *Scientific reports*, 2017. **7**(1): p. 1-9.

- [10] Carbajo, S., et al., *Direct longitudinal laser acceleration of electrons in free space*. Physical Review Accelerators and Beams, 2016. **19**(2): p. 021303.
- [11] Tibai, Z., et al. *THz-pulse-driven particle accelerators*. in *4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology*. 2014.
- [12] Wei, Y., et al., *Investigations into dual-grating THz-driven accelerators*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018. **877**: p. 173-177.
- [13] Plettner, T., P. Lu, and R. Byer, *Proposed few-optical cycle laser-driven particle accelerator structure*. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2006. **9**(11): p. 111301.
- [14] Kaertner, F.X., et al., *AXSIS: Exploring the frontiers in attosecond X-ray science, imaging and spectroscopy*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016. **829**: p. 24-29.
- [15] Vinatier, T., et al. *Beam dynamics in THz dielectric-loaded waveguides for the AXSIS project*. in *Journal of Physics: Conference series*. 2017. IOP Publishing.

- [16] Li, S. and R. Jones, *High-energy electron emission from metallic nano-tips driven by intense single-cycle terahertz pulses*. Nature communications, 2016. **7**(1): p. 1-7.
- [17] Wimmer, L., et al., *Terahertz control of nanotip photoemission*. Nature Physics, 2014. **10**(6): p. 432-436.
- [18] Curry, E., et al., *THz-driven zero-slippage IFEL scheme for phase space manipulation*. New Journal of Physics, 2016. **18**(11): p. 113045.
- [19] Wong, L.J., et al., *Laser-induced linear-field particle acceleration in free space*. Scientific reports, 2017. **7**(1): p. 1-9.
- [20] Fakhari, M., A. Fallahi, and F.X. Kärtner, *THz cavities and injectors for compact electron acceleration using laser-driven THz sources*. Physical Review Accelerators and Beams, 2017. **20**(4): p. 041302.
- [21] Hibberd, M.T., et al., *Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses*. Nature Photonics, 2020. **14**(12): p. 755-759.
- [22] Zhao, L., et al., *Femtosecond relativistic electron beam with reduced timing jitter from THz driven beam compression*. Physical review letters, 2020. **124**(5): p. 054802.
- [23] Othman, M.A., et al., *Parallel-plate waveguides for terahertz-driven MeV electron bunch compression*. Optics express, 2019. **27**(17): p. 23791-23800.



- [24] Zhang, D., et al., *Segmented terahertz electron accelerator and manipulator (STEAM)*. Nature photonics, 2018. **12**(6): p. 336-342.
- [25] Fabiańska, J., G. Kassier, and T. Feurer, *Split ring resonator based THz-driven electron streak camera featuring femtosecond resolution*. Scientific reports, 2014. **4**(1): p. 1-6.