

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

Lézerfizika, nemlineáris optika és spektroszkópia Program

**Rendkívül erős hosszirányú elektromos tér kialakítása
radiálisan polarizált THz-es impulzusok fókuszálásával**

PhD értekezés

Zerihun Tadele Godana

Témavezető:

Prof. Dr. Pálfalvi László

PTE TTK Fizikai Intézet



PÉCS, 2024

1. Bevezetés

Köztudott, hogy erős longitudinális elektromos tér és kis foltméret figyelhető meg, ha a sugárirányban polarizált nyalábokat nagy numerikus apertúrájú parabolatükörrel fókuszáljuk [1, 2], ami lehetőséget ad a részecskegyorsításban való alkalmazásra [3-5]. Az egyetlen optikai elemként szolgáló parabolatükör hatékonyan lefedi a közel teljes 4π térszöget a radiálisan polarizált nyaláb lényegesen szűkebb fókuszpontba való fókuszálásához [6-8]. A nagy reflexiós parabolatükrök kiváló jelöltek elektromágneses nyalábok és impulzusok fókuszálására a THz-es frekvenciatartományban a kromatikus aberrációk hiánya és a nagy numerikus apertúra konfigurációban való alkalmazásuk lehetősége miatt [9, 10]. On-axis és off-axis konfigurációkban egyaránt használják őket.

Fókuszálás során valamennyi polarizációs komponens elektromos és mágneses téreloszlásának pontos meghatározásához vektordiffrakciós elmélet alkalmazása szükséges. A Stratton–Chu vektordiffrakciós módszer [11] pontosabb eredményeket ad, mint a Richards-Wolf módszer [12], különösen a hosszú hullámhosszak esetén [13]. Lineárisan polarizált, monokromatikus elektromágneses síkhullámok [14, 15] és impulzusok [9] paraboloiddal történő fókuszálása már kidolgozott a Stratton–Chu diffrakciós elmélet alapján. A közelmúltban egy átfogóbb vizsgálat számolt be az elektromágneses terek vektormező fókuszáló tulajdonságainak parabolatükörrel történő alkalmazásáról a Stratton-Chu integrál formalizmus alapján [16-18]. A szakirodalom nem lelhető fel a radiálisan polarizált nyalábok parabolatükrökkel történő fókuszálási problematikája Stratton-Chu integrál reprezentáció alapján. Ez az értekezés a Stratton–Chu integrálok alapján egy radiálisan polarizált, monokromatikus, Flat-top sugárnyaláb

fókuszálásakor keletkező elektromos tér egzakt levezetését mutatja be. Megmutattam, hogy nagy numerikus apertúrával rendelkező fókuszgeometria alkalmazásakor erős longitudinális elektromos mező érhető el a fókuszban. Nyilvánvaló, hogy a fókuszban a longitudinális mezőhöz a legnagyobb mértékben a z szimmetriatengelyre merőleges irányokból érkező hullámok adják, míg a tükörközéppont közeléből érkező hullámoknak gyakorlatilag nincs hozzájárulásuk [19].

A nagy numerikus apertúrájú optikai elemmel rendelkező, radiálisan polarizált Gauss-nyaláb fókuszálási tulajdonságai a közelmúltban sok kutatót vonzottak a kis foltméret és a fókuszterületben lévő erős axiális elektromos térkomponensek miatt [20, 21]. A lineárisan polarizált lézerek jellemzően a széles körben ismert Gauss-nyalábképletnek megfelelő viselkedést mutatnak, amely az elektromos térre vonatkozó paraxiális hullámegyenletről származik [22, 23]. Fontos azonban megjegyezni, hogy nem ez az egyetlen megoldás, amely a Maxwell-egyenletekből ésszerű közelítésekkel elérhető. Kirk T. McDonalds levezette a radiálisan polarizált Gauss-vektornyaláb képleteit, amelyet Axicon nyalábnak is neveznek [24]. Levezetése a vektorpotenciál hullámegyenletén belüli paraxiális közelítés alkalmazásán alapult. A disszertáció levezetett képleteket mutat be egy radiálisan polarizált Gauss-vektornyaláb radiális és axiális elektromos komponenseire, valamint azimutális mágneses mezőjére vonatkozóan, amelyet egy tökéletesen reflektáló parabolatükör fókuszál a tengelyen tetszőleges numerikus apertúrával Stratton-Chu vektor diffrakció alapján. A fókuszbeli mező tulajdonságait elemzi a dolgozat, különösen nagy numerikus apertúra esetén. Nagy numerikus apertúra esetén demonstrálja a longitudinális elektromos térkomponens szerepét a részecskegyorsításhoz szükséges intenzív térerő eléréséhez. Radiálisan polarizált vektor Gauss-nyaláb esetén a

nyalábdivergencia hatását vizsgálja a longitudinális elektromos térkomponens axiális és radiális eloszlásaira, kimutatva, hogy a divergens nyalábok eltolják a fizikai fókuszot és befolyásolják a térnövekményt. Arra is rámutat, hogy a fizikai fókusz eltolódása a geometriai fókuszhoz képest a hosszirány mentén lineáris függést mutat a divergenciától [25].

A rendkívül nagy térerősségű THz-es impulzusok megfelelő hullámhosszuk és időbeli periódusuk miatt kiválóan alkalmasak töltött részecskék gyorsítására. A szakirodalomban számos megközelítést javasoltak és demonstráltak a részecskék lézervezérelt technikák alkalmazásával történő gyorsítására [26]. Ezenkívül beszámoltak arról, hogy egy szabadon mozgó elektron végtelen vákuumban a tengely mentén egy erősen fókuszált, ultraintenzív, radiálisan polarizált lézersugár segítségével közvetlenül felgyorsul [27, 28]. Ezt követően a hatékony THz-generálási technikák [29] kifejlesztése lehetővé tette a THz-es impulzusvezérelt részecskegyorsítás reális lehetőségként való megfontolását, ami ösztönözte a kutatókat a THz-es sugárzás effajta felhasználási lehetőségeinek feltárására [30,31]. Jelenleg a THz-es impulzusvezérelt részecskegyorsítás alkalmazása mind a vákuumban [32], mind a hullámvezető struktúrákban [33] rendkívül aktív és ígéretes kutatási területté vált.

A fókuszált THz-es impulzusok potenciális megoldást jelenthetnek a hatékony részecskegyorsításra [34]. Az egyciklusú THz-es impulzusok előnyös hullámhosszuk és az MV/cm szinten elérhető csúcs elektromos mező miatt ígéretesek [35, 36]. A részecskegyorsítás esetére fontos alaposan átgondolni a fókuszban lévő alacsony frekvenciájú THz-es impulzusok elektromos mezőjének alakját [37]. A paraboloid tükör alakjának megválasztása (gyűrű alak/egyszeresen összefüggő felület) potenciálisan

befolyásolhatja a fókuszolt élességét és méreteit. Következésképpen egy teljesen kivilágított, egy kontúrral rendelkező paraboloid nem az optimális fókuszáló elem, ha a cél a maximális longitudinális térkomponens elérése adott impulzus esetén. Ehelyett egy gyűrűszerű paraboloid szegmenst javasol az értekezés, amely a bemenő radiális THz-es mezőt optimálisan alakítja axiális komponenssé. Így ez a tézis egy új elrendezést és módszert javasol radiálisan polarizált THz-es impulzusok erős fókuszálására, vákuumbeli elektrongyorsításra alkalmas erős gyorsító elektromos tér létrehozására. A tervezett összeállítás tartalmaz egy reflexikont a nyaláb alakításához az energiaveszteség minimalizálása érdekében, egy parabolatükör-gyűrűt a radiálisan polarizált impulzusok fókuszálásához, egy szegmentált félhullámlemezről a lineárisan polarizált pumpanyaláb radiálissá alakításához. Tartalmaz továbbá egy szegmentált nemlineáris anyagot a radiálisan polarizált THz-es nyaláb létrehozásához. A fókusz környezetében az elektromos tér eloszlása a Stratton–Chu vektordiffrakciós elmélet segítségével történik. A longitudinális elektromos térerősség és a bemeneti radiális elektromos tér komponens aránya, jelentősen meghaladja az 1000-et. A radiálisan polarizált 1 ps-os egyciklusú THz-es impulzusok 3 mJ impulzusenergiával történő fókuszálásával 100 MV/cm nagyságrendű gyorsuló elektromos térkomponens jósoltak számítások, ígéretes részecskegyorsításra. A közel fénysebességgel mozgó elektron MeV nagyságrendű energianövekedését a gyorsítás egyszerű modell segítségével történő szimulációjával kapjuk. A disszertáció jelentősen hozzájárul a részecskegyorsításhoz azáltal, hogy elméleti alapokat és gyakorlati módszereket biztosít intenzív longitudinális elektromos terek fókuszált radiálisan polarizált elektromágneses impulzusok segítségével történő létrehozásához [38].

Az értekezés számos jövőbeli kutatási irányt javasol. Ez magában foglalja a fókuszbeállítás további optimalizálását és a különböző geometriák feltárását a mező intenzitásának javítása érdekében. A disszertáció javasolja a jelen tanulmányban használt elméleti modellek kísérleti elrendezésekkel történő kiterjesztését és ellenőrzését is, hogy szilárd alapot teremtsen a részecskegyorsítás jövőbeli fejlődéséhez. Ezenkívül a gyorsítási mechanizmus részletes tanulmányozása a jövőbeni feladat lesz, amely magában foglalja az impulzusok és részecskék közötti kölcsönhatás mélyebb feltárását, a fókuszbeállítás tervezésének javítását, valamint a részecskegyorsítási folyamat hatékonyságának és eredményességének növelését.

2. Tudományos célok

A disszertáció fő célja az volt, hogy elméletileg megvizsgálja a rendkívül erős longitudinális elektromos tér létrehozásának lehetőségét radiálisan polarizált monokromatikus lézernyalábok illetve THz-es impulzusok parabola tükör vagy paraboloid gyűrűvel történő fókuszálásával. Ez magában foglalta a longitudinális elektromos tér axiális és radiális eloszlását, valamint az impulzusjellemzőket a fókuszterületben, a részecskegyorsítási alkalmazásokhoz megfelelő nagy térintenzitás elérése érdekében.

A dolgozat konkrét céljai a következők voltak:

- Általános képleteket levezetni a radiálisan polarizált, monokromatikus, Flat-top nyaláb parabolatükörrel történő fókuszálásával előállított elektromos térre. Ez szigorú elméleti elemzést foglal magában a Stratton-Chu vektordiffrakciós elmélet alkalmazásával az elektromos tér eloszlásának vizsgálatára, különös tekintettel a hosszirányú és radiális elektromos térkomponensek jellemzőire a részecskegyorsítási alkalmazásokhoz.
- Általános képleteket kidolgozni egy fókuszált, radiálisan polarizált Gauss-vektornyaláb elektromos és mágneses térjellemzőire parabolatükörrel, Stratton–Chu vektordiffrakciós módszer alapján. Ez a cél a különböző numerikus apertúrákra és a beeső nyaláb eltéréseire összpontosít, hogy meghatározza a hosszirányú elektromos térkomponens tengelyirányú és radiális eloszlását, ami elengedhetetlen a részecskegyorsításhoz.
- A Stratton–Chu vektordiffrakciós elméleten alapuló elektromos téreloszlási képletek levezetésének validálása és összehasonlítása a fókuszterületben a

Rayleigh–Sommerfeld és Richards–Wolf modelleken alapuló elmélettel, kifejezetten a nagy numerikus apertúrák és a rövid hullámhosszak esetén.

- Radiálisan polarizált THz-es impulzusok parabola tükörgyűrűvel történő fókuszálásával rendkívül erős gyorsuló elektromos mezőket generálni. A cél itt egy újszerű elrendezés létrehozása egy reflexicon és egy parabolatükör gyűrűszerű szegmensének felhasználásával a vákuumbeli elektrongyorsításra alkalmas nagy térintenzitás elérése érdekében. Az elektromos téreloszlás számítása a fókuszterületben Stratton–Chu vektordiffrakciós módszerrel.
- Meghatározni egy közel fénysebességgel mozgó elektron MeV nagyságrendű energianövekedését a gyorsítás egyszerű szimulációjával tekintettel a relatív mozgásirány és a gyorsító tér söprési sebességének befolyásoló hatására.

3. Tézispontok

1. A Stratton-Chu vektor diffrakciós módszert alkalmazva összefüggéseket vezettem le parabolatükörrel fókuszált radiálisan polarizált monokromatikus lézernyaláb elektromos és mágneses térerősségének térbeli eloszlására vonatkozóan. A levezetéseket elvégeztem mind homogén intenzitáseloszlású (flat-top) bemenő nyaláb, mind Gauss-intenzitáseloszlású vektornyaláb esetére. Összefüggéseket vezettem le egy – töltött részecskék gyorsításához tervezett – axikonokból és parabolatükör-gyűrűből álló rendszerrel fókuszált radiálisan polarizált nyaláb elektromos térkomponenseinek a térbeli eloszlására vonatkozóan. A parabolatükör-gyűrűre érkező nyaláb transzverzális intenzitáseloszlására három különböző, gyakorlati szempontból releváns esetet tekintettem. Fent említett levezetéseim mindegyike általános érvényű: tetszőleges hullámhossz/fókusz távolság arány és tetszőleges numerikus apertúra esetén alkalmazható. [S1,S2,S3]
2. Az első tézispontban említett esetekben részletesen elemeztem és értelmeztem az elektromos és mágneses térerősség-komponensek térbeli eloszlását a fókusz környezetében – részecskegyorsítási alkalmazásokat szem előtt tartva – különös hangsúlyt szentelve az elektromos térerősség longitudinális komponensének. Valamennyi esetben meghatároztam a fókuszbeli longitudinális elektromos térerősségre vonatkozó skálatörvényt, melynek változói a bemenő nyaláb paraméterei, a fókusz távolság, illetve a fókuszálás geometriájára jellemző paraméter. Megkerestem a maximális longitudinális térerősség eléréséhez tartozó optimális geometriát az egyes esetekben. Megmutattam, hogy gyakorlatban is kivitelezhető, optimalizált fókuszálás esetén a fókuszbeli longitudinális elektromos térerősség és a bemenő radiális elektromos térkomponens hányadosa meghaladja az 1000-t. Megmutattam, hogy a napjainkban hozzáférhető, mJ-os nagyságrendű energiájú terahertzes impulzusok optimalizált fókuszálásával 100 MV/cm nagyságrendű longitudinális elektromos térerősség érhető el, ami részecskegyorsítási alkalmazások szempontjából figyelemre méltó tény. [S1,S2,S3]
3. Parabolatükörrel fókuszált Gauss-intenzitáseloszlású, radiálisan polarizált, monokromatikus vektornyaláb elektromos tere longitudinális komponensének

longitudinális és transzverzális eloszlását vizsgáltam a fókusz környezetében a bemenő nyaláb divergenciájának függvényében. Megmutattam, hogy a valódi fókusz (a longitudinális térerősség komponens maximumhelye) a nyaláb szimmetriatengelye mentén eltolódik a geometriai fókuszhoz képest. Megmutattam, hogy ezen eltolódás a bemenő nyaláb divergenciájának lineáris függvénye. Megállapítottam, hogy a fókuszálással elérhető maximális longitudinális elektromos térkomponens érték a bemenő nyaláb divergenciájának monoton csökkenő függvénye, és azt, hogy e függés jelentős. Megmutattam továbbá, hogy az elektromos téramplitúdó longitudinális komponensének transzverzális eloszlásában a mellékmaximum értékek főmaximum értékhez viszonyított aránya a nyalábdivergencia mértékével növekszik. [S2]

4. Numerikus kódot alkalmaztam relativisztikus elektronok parabolatükör-gyűrűvel lefókuszált terahertzes impulzusok longitudinális elektromos terével történő utógyorsításának modellezésére. Szimulációim szerint 3 mJ terahertzes impulzusenergiát, 1 ps impulzushosszt és 20 illetve 40°-os látószögben kivilágított 5 cm fókusztávolságú parabolatükör-gyűrűt feltételezve az elektronok 0,28 MeV/0,23 MeV (20°), illetve 0,63 MeV/0,36 MeV (40°) energianyereségre tesznek szert attól függően, hogy a közel fénysebességgel mozgó elektronok haladási iránya az elektromos tér söprésének irányával azonos/ellentétes. [S3]

Publikációk listája

Disszertációhoz kötődő publikációk

[S1] **Z. T. Godana**, J. Hebling, and L. Pálfalvi, "Focusing of Radially Polarized Electromagnetic Waves by a Parabolic Mirror," in *Photonics*, vol. 10, no. 7: MDPI, p. 848, 2023.

[S2] L. Pálfalvi, **Z. T. Godana**, and J. Hebling, "Electromagnetic Field Distribution and Divergence-Dependence of a Radially Polarized Gaussian Vector Beam Focused by a Parabolic Mirror," *arXiv preprint arXiv:2406.00795*, 2024.

[S3] L. Pálfalvi, **Z. T. Godana**, G. Tóth, and J. Hebling, "Generation of extremely strong accelerating electric field by focusing radially polarized THz pulses with a paraboloid ring," *Optics & Laser Technology*, vol. 180, p. 111554, 2025.

Előadások

[E1] **Z. T. Godana**, J. Hebling, and L. Pálfalvi, "Radially Polarized Electromagnetic Wave Focused by a Segment of a Parabolic Mirror," in *Proceedings of the 6th International Conference on Optics, Photonics and Lasers (OPAL)*, 2023, pp64. (ISBN: 978-84-09-48335-8).

[E2] L. Pálfalvi, **Z. T. Godana**, G. Tóth, and J. Hebling, "Extremely High Electric Field for Electron Acceleration by Focusing of THz Pulses with Paraboloid Mirrors," in *10th Optical Terahertz Science and Technology (OTST)*, 2024, Paper WeA5.106.

[E3] L. Pálfalvi, **Z. T. Godana**, G. Tóth, and J. Hebling, "Production of Extremely Strong Accelerating Electric Field by Focusing THz Pulses with a Paraboloid Ring," in *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2024: Optica Publishing Group, Paper JTu2A.63. (ISBN: 978-1-957171-39-5).

[E4] **Zerihun Tadele Godana**, László Pálfalvi, György Tóth and János Hebling, "Extremely Strong Longitudinal Electric Field by Focusing of Radially Polarized THz Pulses with a Paraboloid Ring," in *Proceedings of the Doctoral Students' Conference for the Discussion of Optical Concepts (DoKDoK)*, 2024, Friedrich Schiller University Jena, Abbe School of Photonics, Germany, pp72.

Irodalomjegyzék

- [1] R. Dorn, S. Quabis, and G. Leuchs, "Sharper focus for a radially polarized light beam," *Physical review letters*, vol. 91, no. 23, p. 233901, 2003.
- [2] H. Dehez, A. April, and M. Piché, "Needles of longitudinally polarized light: guidelines for minimum spot size and tunable axial extent," *Optics Express*, vol. 20, no. 14, pp. 14891-14905, 2012.
- [3] V. Marceau, C. Varin, and M. Piché, "Validity of the paraxial approximation for electron acceleration with radially polarized laser beams," *Optics letters*, vol. 38, no. 6, pp. 821-823, 2013.
- [4] S. Payeur *et al.*, "Generation of a beam of fast electrons by tightly focusing a radially polarized ultrashort laser pulse," *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 4, 2012.
- [5] L. J. Wong and F. X. Kärtner, "Direct acceleration of an electron in infinite vacuum by a pulsed radially-polarized laser beam," *Optics express*, vol. 18, no. 24, pp. 25035-25051, 2010.
- [6] N. Davidson and N. Bokor, "High-numerical-aperture focusing of radially polarized doughnut beams with a parabolic mirror and a flat diffractive lens," *Optics Letters*, vol. 29, no. 12, pp. 1318-1320, 2004.
- [7] A. April and M. Piché, " 4π Focusing of TM 01 beams under nonparaxial conditions," *Optics express*, vol. 18, no. 21, pp. 22128-22140, 2010.
- [8] J. Stadler, C. Stanciu, C. Stupperich, and A. Meixner, "Tighter focusing with a parabolic mirror," *Optics letters*, vol. 33, no. 7, pp. 681-683, 2008.
- [9] H. Zhang *et al.*, "Parabolic Mirror Focusing of Spatiotemporally Coupled Ultrashort Terahertz Pulses," *IEEE Photonics Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 1-8, 2023.
- [10] M. Wichmann *et al.*, "Terahertz plastic compound lenses," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 18, pp. 4186-4191, 2013/06/20 2013, doi: 10.1364/AO.52.004186.
- [11] J. A. Stratton and L. Chu, "Diffraction theory of electromagnetic waves," *Physical review*, vol. 56, no. 1, p. 99, 1939.
- [12] B. Richards and E. Wolf, "Electromagnetic diffraction in optical systems, II. Structure of the image field in an aplanatic system," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 253, no. 1274, pp. 358-379, 1959.
- [13] X. Zeng and X. Chen, "Characterization of tightly focused vector fields formed by off-axis parabolic mirror," *Optics Express*, vol. 27, no. 2, pp. 1179-1198, 2019.
- [14] P. Varga and P. Török, "Focusing of electromagnetic waves by paraboloid mirrors. I. Theory," *JOSA A*, vol. 17, no. 11, pp. 2081-2089, 2000.
- [15] P. Varga and P. Török, "Focusing of electromagnetic waves by paraboloid mirrors. II. Numerical results," *JOSA A*, vol. 17, no. 11, pp. 2090-2095, 2000.
- [16] T. Phan *et al.*, "High-efficiency, large-area, topology-optimized metasurfaces," *Light: Science & Applications*, vol. 8, no. 1, p. 48, 2019.

- [17] J. Grand and E. C. Le Ru, "Practical implementation of accurate finite-element calculations for electromagnetic scattering by nanoparticles," *Plasmonics*, vol. 15, no. 1, pp. 109-121, 2020.
- [18] H. Guerboukha *et al.*, "Efficient leaky-wave antennas at terahertz frequencies generating highly directional beams," *Applied Physics Letters*, vol. 117, no. 26, 2020.
- [19] Z. T. Godana, J. Hebling, and L. Pálfalvi, "Focusing of Radially Polarized Electromagnetic Waves by a Parabolic Mirror," in *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 7: MDPI, p. 848.
- [20] G. Endale, D. Mohan, and S. Yadav, "Focusing of radially polarized bessel gaussian and hollow gaussian beam of high NA to achieve super resolution," *Optik*, vol. 253, p. 168586, 2022.
- [21] S. W. Jolly, "Modeling the focusing of a radially polarized laser beam with an initially flat-top intensity profile," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 41, no. 7, pp. 1390-1396, 2024.
- [22] B. E. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*. John Wiley & sons, 2019.
- [23] B. D. Guenther, *Modern optics*. OUP Oxford, 2015.
- [24] K. T. McDonald, "Axicon Gaussian laser beams," *arXiv preprint physics/0003056*, 2000.
- [25] L. Pálfalvi, Z. T. Godana, and J. Hebling, "Electromagnetic Field Distribution and Divergence-Dependence of a Radially Polarized Gaussian Vector Beam Focused by a Parabolic Mirror," *arXiv preprint arXiv:2406.00795*, 2024.
- [26] L. J. Wong *et al.*, "Laser-induced linear-field particle acceleration in free space," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 11159, 2017.
- [27] C. Varin *et al.*, "Direct electron acceleration with radially polarized laser beams," *Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 70-93, 2013.
- [28] S. W. Jolly, "On the importance of frequency-dependent beam parameters for vacuum acceleration with few-cycle radially polarized laser beams," *Optics Letters*, vol. 45, no. 14, pp. 3865-3868, 2020.
- [29] J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, M. C. Hoffmann, and J. Hebling, "Towards generation of mJ-level ultrashort THz pulses by optical rectification," *Optics express*, vol. 19, no. 16, pp. 15090-15097, 2011.
- [30] J. Hebling, J. Fülöp, M. Mechler, L. Pálfalvi, C. Tóke, and G. Almási, "Optical manipulation of relativistic electron beams using THz pulses," *arXiv preprint arXiv:1109.6852*, 2011.
- [31] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Tóth, and J. Hebling, "Evanescent-wave proton postaccelerator driven by intense THz pulse," *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, vol. 17, no. 3, p. 031301, 2014.
- [32] Z. Tibai, S. Turnár, G. Tóth, J. Hebling, and S. W. Jolly, "Spatiotemporal modeling of direct acceleration with high-field terahertz pulses," *Optics express*, vol. 30, no. 18, pp. 32861-32870, 2022.

- [33] S. Turnár, G. Krizsán, J. Hebling, and Z. Tibai, "Waveguide structure based electron acceleration using terahertz pulses," *Optics Express*, vol. 30, no. 15, pp. 27602-27608, 2022.
- [34] Z. Tibai *et al.*, "Relativistic electron acceleration by focused THz pulses," *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 51, no. 13, p. 134004, 2018.
- [35] B. Zhang *et al.*, "1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 15, no. 3, p. 2000295, 2021.
- [36] G. Tóth, G. Illés, G. Nazymbekov, N. Mbithi, G. Almási, and J. Hebling, "Possibility of CO₂ laser-pumped multi-millijoule-level ultrafast pulse terahertz sources," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 999, 2024.
- [37] S. Turnár, J. Hebling, J. Fülöp, G. Tóth, G. Almási, and Z. Tibai, "Design of a THz-driven compact relativistic electron source," *Applied Physics B*, vol. 127, pp. 1-7, 2021.
- [38] L. Pálfalvi, Z. T. Godana, G. Tóth, and J. Hebling, "Generation of extremely strong accelerating electric field by focusing radially polarized THz pulses with a paraboloid ring," *Optics & Laser Technology*, vol. 180, p. 111554, 2025.